



Уральский
федеральный
университет

имени первого Президента
России Б.Н.Ельцина

Уральский
энергетический
институт

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ. ЭКОЛОГИЯ, ЭКОНОМИКА, БЕЗОПАСНОСТЬ И ПОДГОТОВКА КАДРОВ – 2016

Материалы научно-практической конференции
(Екатеринбург, 11 октября 2016 г.)



<p>Министерство образования и науки Российской Федерации</p> <p>Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина</p> <p>Уральский энергетический институт</p> <p><i>Посвящается 55-летию кафедры «Атомные станции и возобновляемые источники энергии» (до 2012 г. кафедра «Атомная энергетика»)</i></p> <p>ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ. ЭКОЛОГИЯ, ЭКОНОМИКА, БЕЗОПАСНОСТЬ И ПОДГОТОВКА КАДРОВ – 2016</p> <p>Материалы научно-практической конференции (Екатеринбург, 11 октября 2016 г.)</p> <p>Екатеринбург УрФУ 2017</p>	<p>УДК621.039+620.9-047.645+621.004.18 ББК 31я431 П27</p> <p>Редакционная коллегия: <i>С. Е. Щеклеин</i>, д-р техн. наук, профессор, завкафедрой «Атомные станции и возобновляемые источники энергии» (АСиВИЭ) УрФУ; <i>О. Л. Ташлыков</i>, канд. техн. наук, доцент кафедры АСиВИЭ УрФУ; <i>В. И. Велькин</i>, канд. техн. наук, доцент кафедры АСиВИЭ УрФУ; <i>В. А. Климова</i>, ст. преподаватель кафедры АСиВИЭ УрФУ (ответственная за выпуск)</p> <p><i>На обложке – фотография С. Тена</i></p> <p>Перспективные энергетические технологии. П27 Экология, экономика, безопасность и подготовка кадров – 2016 : материалы научно- практической конференции (Екатеринбург, 11 октября 2016 г.). – Екатеринбург : УрФУ, 2016. – 197 с., ил.</p> <p>ISBN 978-5-321-02522-2</p> <p>В сборник включены материалы и тезисы докладов, представленных на научно-практической конференции «Перспективные энергетические технологии. Экология, экономика, безопасность и подготовка кадров – 2016», посвященной 55-летию кафедры «Атомные станции и возобновляемые источники энергии» (до 2012 г. «Атомная энергетика»). Тезисы докладов отражают широкий диапазон научно-исследовательских работ, проводимых в вузах, производственных и исследовательских организациях по проблемам энергетической безопасности, разработки новых энергетических технологий и подготовки персонала для работы в области энергетики.</p> <p>УДК 621.039+620.9-047.645+621.004.18 ББК 31я431</p>
--	--

Ответственность за содержание и оформление материалов несут авторы статей.
Все права на размножение и распространение материалов в любой форме остаются за
разработчиками.

Научное электронное издание

Материалы публикуются в авторской версии. Оформление текста *В. А. Климовой*.
Одобрено к публикации 03.02.17. Гарнитура Times New Roman. Уч.-изд. л. 23,6.

РИО ИПЦ УрФУ, 620049, Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 5
Тел. 8 (343) 375-48-25, 375-46-85, 374-19-41; e-mail: rio@urfu.ru

ISBN 978-5-321-02522-2

© Уральский федеральный университет, 2017
© Тен С., фото (обложка, с. 6, 41), 2017

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Секция 1 Подготовка кадров для атомной отрасли России</i>	<i>6</i>
<i>С. Е. Щеклеин, В. Ю. Балдин, В. А. Бегалов, В. И. Велькин. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПОДГОТОВКИ В УРАЛЬСКОМ ФЕДЕРАЛЬНОМ УНИВЕРСИТЕТЕ СПЕЦИАЛИСТОВ ДЛЯ СОВРЕМЕННОЙ ЭНЕРГЕТИКИ И ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ</i>	<i>7</i>
<i>О. Л. Ташлыков, С. Е. Щеклеин, А. И. Карпенко, А. И. Бельтюков, А. М. Тучков, Д. М. Химчак. ПОДГОТОВКА СПЕЦИАЛИСТОВ ДЛЯ ИННОВАЦИОННЫХ ЭНЕРГОБЛОКОВ АЭС</i>	<i>14</i>
<i>О. Л. Ташлыков, С. Е. Щеклеин, А. М. Тучков, Г. П. Титов, Д. А. Носов. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОГРАММНО-ТРЕНАЖЕРНЫХ СРЕДСТВ ПРИ ПОДГОТОВКЕ СПЕЦИАЛИСТОВ ДЛЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ</i>	<i>20</i>
<i>О. Л. Ташлыков, С. Е. Щеклеин, Г. А. Новиков. О ФОРМИРОВАНИИ КУЛЬТУРЫ БЕЗОПАСНОСТИ В ПРОЦЕССЕ ОБУЧЕНИЯ СТУДЕНТОВ В ВУЗЕ</i>	<i>24</i>
<i>В. Ю. Лукьяненко, А. Ф. Михайлова, О. Л. Ташлыков. ОПЫТ ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ ДЛЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ ЧЕРЕЗ НАУКУ</i>	<i>29</i>
<i>В. А. Климова, О. Л. Ташлыков, Та Ван Тхьонг, Ха Хьюи Мань. ОСОБЕННОСТИ ПОДГОТОВКИ ИНОСТРАННЫХ СПЕЦИАЛИСТОВ ДЛЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ СТРАН-ПАРТНЕРОВ РОСАТОМА В УРФУ</i>	<i>32</i>
<i>К. В. Лим, А. А. Синяков. СТУДЕНЧЕСКИЕ ОТРЯДЫ ГК «РОСАТОМ»</i>	<i>37</i>
<i>Секция 2 Атомная энергетика – экология, экономика и безопасность.....</i>	<i>41</i>
<i>Д. Е. Шумков, В. А. Климова, О. Л. Ташлыков. ЗАДАЧА ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ РАСХОЛАЖИВАНИЯ ШАХТЫ-ХРАНИЛИЩА ОТРАБОТАВШИХ ТЕПЛО ВЫДЕЛЯЮЩИХ СБОРОК</i>	<i>42</i>
<i>О. Л. Ташлыков, А. Н. Сесекин, Ю. Ф. Долгий, Г. Ю. Дубовой. К ВОПРОСУ О ВОЗМОЖНОСТИ ОПТИМИЗАЦИИ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ ПО ПЕРЕГРУЗКЕ ТОПЛИВНЫХ СБОРОК РЕАКТОРОВ НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ</i>	<i>45</i>
<i>А. Э. Лойко, Г. П. Титов, С. Е. Щеклеин. ИЗМЕРЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ КРИПТОНА В ВОЗДУХЕ МЕТОДОМ ТЕРМОДИФФУЗИИ</i>	<i>48</i>
<i>Ю. А. Кропачев, О. Л. Ташлыков. ОПТИМИЗАЦИЯ РАДИАЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ НА ЭТАПЕ ВЫВОДА ЭНЕРГОБЛОКОВ АЭС ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ</i>	<i>50</i>
<i>А. И. Бельтюков, А. И. Карпенко, П. П. Говоров, А. М. Тучков. ОПЫТ ПРОВЕДЕНИЯ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ РАБОТ НА ЭНЕРГОБЛОКЕ БН-600</i>	<i>57</i>
<i>А. В. Ровнейко, О. Л. Ташлыков, С. Е. Щеклеин. ОСОБЕННОСТИ ВЫВОДА ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ РЕАКТОРОВ НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ</i>	<i>61</i>
<i>О. Л. Ташлыков, С. Е. Щеклеин, И. М. Русских, Е. Н. Селезнев, А. В. Козлов. РЕАЛИЗАЦИЯ ПРИНЦИПА ОПТИМИЗАЦИИ ПУТЕМ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СОСТАВА ГОМОГЕННЫХ РАДИАЦИОННО-ЗАЩИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ПЛАНИРУЕМЫМ УСЛОВИЯМ ОБЛУЧЕНИЯ</i>	<i>67</i>
<i>Н. Н. Ошканов. САМООБЕСПЕЧЕНИЕ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ ЯДЕРНЫМ ТОПЛИВОМ</i>	<i>72</i>
<i>А. М. Тучков, А. В. Ровнейко, О. Л. Ташлыков, С. Е. Щеклеин. СИСТЕМА МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА НА АЭС С РЕАКТОРАМИ НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ С НАТРИЕВЫМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ</i>	<i>73</i>
<i>А. Г. Шастин, М. С. Соколова. ИННОВАЦИОННЫЕ СПОСОБЫ ДЕЗАКТИВАЦИИ И КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ РАО</i>	<i>79</i>
<i>В. П. Ремез, А. А. Иошин, О. Л. Ташлыков, С. Е. Щеклеин, С. Б. Кузнецов. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ СОРБЦИОННОЙ ОЧИСТКИ ЖИДКИХ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ ОТ РАДИОАКТИВНЫХ ИЗОТОПОВ КОБАЛЬТА</i>	<i>80</i>

<i>Секция 3 Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии</i>	84
<i>К. С. Денисов, Л. Р. Хайретдинова, В. И. Велькин. АНАЛИЗ КОМПЬЮТЕРНЫХ ПРОГРАММ ПО ВЫБОРУ ОБОРУДОВАНИЯ СИСТЕМЫ ВИЭ</i>	85
<i>А. Н. Лямбель, В. М. Пахалуев, С. Е. Щеклеин. АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРООТОПЛЕНИЯ МНОГOKBAPТИРНОГО ДОМА</i>	89
<i>Л. Е. Лях, А. И. Попов. БЕСПЛОТИННАЯ ГЭС С ПРИНУДИТЕЛЬНЫМ РАЗГОНОМ ТЕКУЩЕГО ПОТОКА</i>	93
<i>А. Ю. Борисов, Е. И. Маринкова, А. А. Шабурова, В. Э. Фризен. ВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ ИНДУКЦИОННЫЙ НАГРЕВ АЛЮМИНИЕВЫХ ПРЕКУРСОРОВ</i>	95
<i>В. М. Пахалуев, С. Е. Щеклеин, А. В. Матвеев. ГЕЛИОСИСТЕМА С СЕЗОННЫМ АККУМУЛЯТОРОМ ТЕПЛОТЫ</i>	97
<i>А. С. Седов, А. С. Колпаков. ДЕАЭРАЦИОННАЯ УСТАНОВКА НА ОСНОВЕ ВИХРЕВОГО ЦИКЛОНА-ДЕГАЗАТОРА. КОНСТРУКЦИЯ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ</i>	100
<i>И. В. Яковлев, А. И. Попов. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ СБРОСОВ НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПОТРЕБНОСТИ ГОРОДА</i>	102
<i>П. А. Ральников, Н. А. Абаимов, А. Ф. Рыжков. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЧИСЛЕННЫХ МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ СРАВНИТЕЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ РАБОТЫ ПИЛОТНЫХ ПОТОЧНЫХ ГАЗИФИКАТОРОВ</i>	105
<i>Ю. Р. Гильметдинова, Л. А. Шмакова, Е. В. Микула. К ВОПРОСУ О КОНЦЕПЦИИ ТЕПЛООБМЕННОГО ЭЛЕМЕНТА КОНВЕКТИВНОГО ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО НАГРЕВАТЕЛЯ КОМПРИМИРОВАННОГО ВОЗДУХА</i>	108
<i>Ю. А. Марчкова, В. А. Микула, П. С. Филиппов, Е. В. Микула. К ВОПРОСУ О КОНЦЕПЦИИ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ СИНТЕЗ-ГАЗА ДЛЯ ПГУ С ВЦГ</i>	111
<i>Н. А. Семенов, Р. Р. Хасанов, Г. И. Худякова. КИНЕТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ КОНВЕРСИИ УГОЛЬНОГО ТОПЛИВА</i>	114
<i>Е. И. Маринкова, А. Ю. Борисов, А. А. Шабурова, В. Э. Фризен. ЛЕВИТАЦИОННАЯ ПЛАВКА В КОНУСНОМ ВЫСОКОЧАСТОТНОМ ИНДУКТОРЕ С ОБРАТНЫМ ВИТКОМ</i>	117
<i>Д. А. Немков, А. В. Матвеев, С. Е. Щеклеин, Ю. Е. Немихин. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ДВУОСНОГО СОЛНЕЧНОГО ТРЕКЕРА</i>	118
<i>Е. С. Лабинцев, В. Г. Тупоногов, Ю. А. Каграманов. МЕТОДЫ СЕРООЧИСТКИ БИО СИНТЕЗ-ГАЗА В ПАРОГАЗОВЫХ УСТАНОВКАХ С ВНУТРИЦИКЛОВОЙ ГАЗИФИКАЦИЕЙ</i>	121
<i>С. А. Глухов, А. И. Попов. МОБИЛЬНАЯ ВОЛНОВАЯ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯ</i>	124
<i>К. А. Безбородов, А. С. Колпаков. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЫЛЕОЧИСТКИ В ВИХРЕВОМ ЦИКЛОНЕ</i>	127
<i>П. С. Кузнецов, Ю. М. Голдобин. О КИНЕТИКЕ ГОРЕНИЯ КАПЕЛЬ РАСПЫЛЕННОГО ЖИДКОГО ТОПЛИВА</i>	130
<i>К. С. Денисов, Л. Р. Хайретдинова, В. И. Велькин. ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ МАЛОМЕРНОГО ВОДНОГО ТРАНСПОРТА С ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЕМ НА ОСНОВЕ СОЛНЕЧНЫХ ФЭП</i>	132
<i>А. Д. Никитин, В. А. Бегалов. ОЦЕНКА ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ ПРИ МОДЕРНИЗАЦИИ СИСТЕМЫ ВОДООТВЕДЕНИЯ (НА ПРИМЕРЕ МО СРЕДНЕУРАЛЬСК)</i>	134
<i>А. Д. Никитин, И. В. Кузнецов, С. Е. Щеклеин. ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МНОГОКОЛПАКОВЫХ ПЕЧЕЙ ДЛЯ ОТОПЛЕНИЯ ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ</i>	137
<i>Т. В. Терентьева, В. И. Велькин. ПЕРСПЕКТИВЫ СОЗДАНИЯ МАЛЫХ ГЭС НА СУЩЕСТВУЮЩИХ ГТС И ОБЗОР СОСТОЯНИЯ ФОНДА ГТС СВЕРДЛОВСКОЙ ОБЛАСТИ</i>	139
<i>А. Д. Шутов, А. И. Попов. ПРЕИМУЩЕСТВА ВЕТРОДВИГАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ЭФФЕКТА МАГНУСА</i>	143
<i>Е. А. Мерзлякова, М. А. Усова, А. И. Попов. РЕАКТОР АНАЭРОБНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ БИОМАССЫ</i>	145

<i>Н. В. Обухова, А. И. Попов.</i> СИСТЕМА УСКОРЕННОЙ АЭРОБНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ БИОМАССЫ.....	148
<i>М. А. Терпелец, Е. В. Арбузова, А. В. Смотрицкий.</i> УВЕЛИЧЕНИЕ ВЫХОДА БИОГАЗА ЗА СЧЁТ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ СУБСТРАТА	150
<i>Р. В. Радченко, В. В. Тюльпа.</i> ЭКСЕРГЕТИЧЕСКИЙ И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ МЕТОДЫ СРАВНЕНИЯ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ	153
<i>Е. С. Шульгина, Ю. Е. Немихин.</i> ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ В ПОДРАЗДЕЛИИ «НЕФТЕКАМСКИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЕТИ»	158
<i>Ю. А. Каграманов, В. Г. Тупоногов, А. Ф. Рыжков.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ СЕРООЧИСТКИ СИНТЕЗ ГАЗОВ	161
<i>Секция 4 Молодежь в энергетике</i>	165
<i>И. А. Таширева, С. Е. Щеклеин.</i> ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ И ВНЕДРЕНИЯ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ ЯДЕРНОЙ УСТАНОВКИ С МНОГОЦЕЛЕВЫМ РЕАКТОРОМ МБИР	166
<i>О. В. Лазаренко, С. Е. Щеклеин.</i> ЭНЕРГОБЛОК С РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКОЙ БН-1200.....	169
<i>Д. Ю. Балакин, С. Е. Щеклеин.</i> РЕАКТОР «ПИК». КОНСТРУКЦИЯ И ХАРАКТЕРИСТИКИ.....	172
<i>М. М. Иванов, Л. Г. Гальперин, Е. Ю. Павлюк.</i> ЗАДАЧА ДИФФУЗИИ ОТ СФЕРИЧЕСКОЙ ЧАСТИЦЫ	174
<i>К. Н. Циглевкина, Д. О. Черных, О. Л. Ташлыков.</i> ВОЗМОЖНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ СБРОСНОЙ ТЕПЛОТЫ АЭС В ТЕПЛИЧНОМ ХОЗЯЙСТВЕ	176
<i>И. А. Шеломенцев, С. Е. Щеклеин.</i> СТРАТЕГИЯ РАЗВИТИЯ АТОМНОЙ И ВОЗОБНОВЛЯЕМОЙ ЭНЕРГЕТИКИ ДО 2030 Г.	178
<i>Исмаил Хоссейн, Г. Е. Чиканцев, В. И. Велькин.</i> АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПАССИВНЫХ УСТРОЙСТВ УПРАВЛЕНИЯ ВИБРАЦИЯМИ ДЛЯ ТРУБОПРОВОДОВ С ДВУХФАЗНОЙ СРЕДОЙ.....	180
<i>Исмаил Хоссейн, Мохаммад Шавкат Акбар, В. И. Велькин, С. Е. Щеклеин.</i> ОЦЕНКА СЕЙСМИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ВЫБОРЕ ПЛОЩАДКИ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬСТВА АЭС В БАНГЛАДЕШ	184
ОБ АВТОРАХ	188

Секция 1

Подготовка кадров для атомной отрасли России



УДК 621.039+620.9-047.645+621.004.18

С. Е. Щеклеин, В. Ю. Балдин, В. А. Бегалов, В. И. Велькин

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина,
г. Екатеринбург, Россия

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПОДГОТОВКИ В УРАЛЬСКОМ ФЕДЕРАЛЬНОМ УНИВЕРСИТЕТЕ СПЕЦИАЛИСТОВ ДЛЯ СОВРЕМЕННОЙ ЭНЕРГЕТИКИ И ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ

Представлены перспективы развития современных энергетических технологий: атомной и возобновляемой энергетики, повышения эффективности использования энергетических ресурсов в мире и в России, а также основные научные результаты, итоги образовательной деятельности и возможности подготовки специалистов для этих направлений в Уральском федеральном университете.

Ключевые слова: современные энергетические технологии; атомная энергетика; возобновляемая энергетика; энергосбережение; повышение эффективности использования энергетических ресурсов; образовательная деятельность; подготовка специалистов для энергетики и промышленных предприятий.

S. E. Shcheklein, V. Y. Baldin, V. A. Begalov, V. I. Velkin

Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

MAIN RESULTS AND PERSPECTIVES OF SPECIALISTS TRAINING IN URAL FEDERAL UNIVERSITY FOR MODERN ENERGY PRODUCTION INDUSTRY AND IMPROVING ENERGY EFFICIENCY

The perspectives of developing of advanced energy technologies: nuclear power and renewable energy production, more efficient use of energy resources in the world and in Russia are presented. The main scientific results, the outcomes of educational activities and opportunities of training specialists for these directions in the Ural Federal University are shown.

Key words: advanced energy technologies; nuclear power; renewable energy; energy saving; increase of energy resources use efficiency; educational activities; training of specialists for the energy and industrial enterprises.

По данным министерства энергетики РФ в 2015 году в мире было введено 67 тысяч МВт ветровых и 57 тысяч МВт солнечных энергоустановок. Это сопоставимо с половиной всей мощности генерации нашей страны. При этом в России 60 % электроэнергии вырабатывается на тепловых электростанциях, где сырьем является газ (доля которого составляет 60 %) и уголь (40 %). Оставшиеся 40 % делятся таким образом: 18 % – атомная генерация и порядка 17 % – гидрогенерация. На долю возобновляемых источников энергии (включая биомассу) приходится 5 %. До 2040 г. это соотношение не будет существенно меняться: незначительно – на 1–2 % – увеличится доля атомной генерации, снизится доля тепловой генерации. Доля ВИЭ вырастет [1].

Согласно докладу Всемирного энергетического совета «Интеграция возобновляемых источников в энергетических системах 2016», доля возобновляемой энергии, в том числе гидроэнергия, в настоящее время в мире составляет более 30 % совокупной мощности электростанций и 23 % от всего производства электроэнергии [2].

Сведения, представленные в материалах Международного энергетического агентства (МЭА), демонстрируют соотношение видов топлива и источников энергии, которые будут использоваться в мире к 2050 г. (рис. 1) [3].

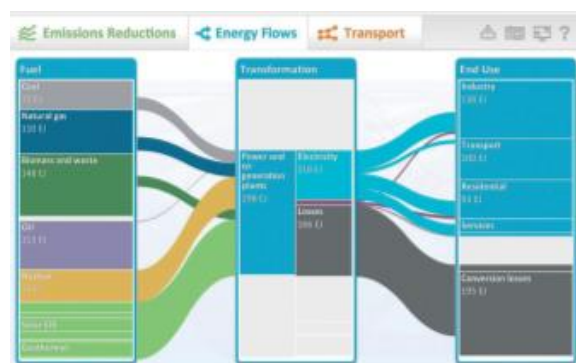


Рис. 1. Соотношение видов топлива и источников энергии, планируемое потребление энергоресурсов в мире к 2050 г., в ЭДж (уголь – 72, природный газ – 110, биомасса и отходы – 148, нефть – 113, ядерная энергия – 74, солнечная, геотермальная энергия – данные не приведены)

По мнению экспертов МЭА, политические предпочтения в пользу низкоуглеродных технологий в энергетике подкрепляются тенденциями издержек, так как добыча нефти и природного газа постепенно становится более дорогой, тогда как стоимость технологий возобновляемых источников и более эффективного конечного потребления продолжает падать. Мероприятия по повышению энергоэффективности набирают силу: энергетическая эффективность играет ключевую роль в ограничении роста энергопотребления до одной трети к 2040 году, тогда как мировая экономика вырастет на 150 % [4].

Поиск новых энергетических возможностей крупномасштабного энергетического производства показывает реальную возможность применения для этих целей ядерной энергии. Однако использование атомной энергетики (как и энергетики на органическом топливе) ограничивается природными запасами изотопа урана-235. Современный уровень потребления урана-235 обеспечит существование отрасли не более чем на 40-50 лет. Одним из перспективных путей решения данной проблемы является разработка и широкомасштабное использование ядерных реакторов-размножителей (бридеров), способных производить из распространенного в природе изотопа урана-238 искусственное ядерное топливо – плутоний. Плутониевое или смешанное уран-плутониевое топливо может успешно применяться практически на всех типах существующих АЭС, расширяя эру атомной энергетики на столетия. В России создана и в течение более чем 30 лет успешно работает на Белоярской площадке вблизи города Екатеринбурга АЭС (БАЭС) с ядерным реактором на быстрых нейтронах – БН-600. Опыт эксплуатации БН-600 показывает беспрецедентно высокие экологические параметры установки [5]. В 2014 г. введен в эксплуатацию новый энергоблок такого типа БН-800. В завершающей стадии проектирования находится ядерный энергоблок БН-1200.

Разработка и промышленная верификация данного типа АЭС направлена на решение ключевой проблемы атомной энергетики мира – ликвидации надвигающегося дефицита энергетического урана-235.

Ученые и преподаватели Уральского федерального университета (УрФУ) внесли и продолжают вносить вклад в научную и инженерно-техническую поддержку развития данного направления. Сотрудниками БАЭС под руководством преподавателей кафедры защищено более 10 кандидатских и докторских диссертаций по данной тематике.

Особенно велик вклад УрФУ, являющегося основным вузом России по подготовке специалистов для сооружения, наладки и эксплуатации энергоблоков АЭС с реакторами-размножителями на быстрых нейтронах, в комплектацию персонала инновационных энергоблоков. По этому направлению вуз располагает уникальной тренажерной базой, стендами-имитаторами оборудования и процессов (рис. 2).

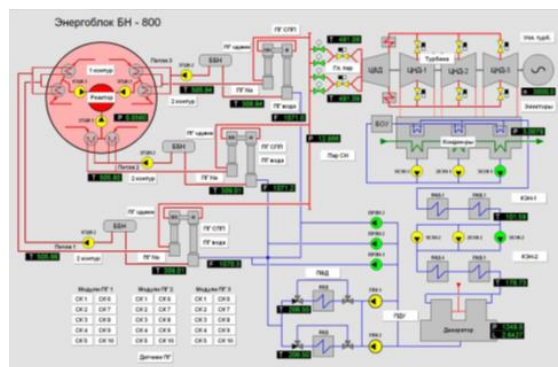


Рис. 2. Тренажерный комплекс управления энергоблоком БН-800

Научная школа УрФУ по безопасности и эффективности АЭС объединяет в себе все современные достижения науки и техники в области управления экологической безопасностью ядерной системы, включая вопросы оптимизации радиационной защиты (в том числе создание новых защитных материалов и оптимизацию радиационных нагрузок методами математического моделирования), переработки и кондиционирования радиоактивных отходов. Планируемые научные исследования нацелены также на реализацию проекта ядерной системы четвертого поколения с реакторными установками на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем (БН-1200), включая программы управления знаниями и системной подготовки специалистов для данного направления.

К числу перспективных энергетических технологий принято относить возобновляемые источники энергии, основанные на преобразовании теплоты земли, энергии солнца, ветра, речных и океанических течений и волн в полезную электрическую и тепловую форму. Технический потенциал данных источников энергии для территории России чрезвычайно велик и оценивается на уровне более 4000 т у. т., что превосходит суммарное потребление всех ТЭС и АЭС страны более, чем в 4 раза [6].

Работы ученых УрФУ по данному направлению связаны с разработкой конструкций новых систем преобразования природной энергии в полезные формы; разработкой технологий интеграции нерегулярных приходов возобновляемой энергии в существующие системы жизнеобеспечения.

Для решения этих задач в УрФУ созданы учебные и натурные полигоны, оснащенные рядом установок и систем возобновляемой энергетики (рис. 3, таблица 1). Основной полигон УрФУ оснащен рядом установок разного типа, данные с которых собираются и передаются в единый центр сбора и обработки информации (рис. 4).



Рис. 3. Экспериментальные стенды УрФУ

Таблица 1

Характеристики основных экспериментальных установок УрФУ

Установка	Мощность, Вт	Кол-во характеристик
Ветроэлектростанция	3000	12
Фотоэлектронный умножитель	2500	12
Ветроэлектростанция	2000	7
Солнечный коллектор	1500	6
Солнечный концентратор	500	8
Биогазовая установка		6
Тепловой насос	5000	5
Метеорологический комплекс		6

Особенностью системы сбора информации является территориальная распределенность установок и обрабатывающей аппаратуры. Для решения этой задачи создана локальная сеть с точкой WiFi доступа. Данные, собираемые с установок через Switch 1 и точку доступа AirGrid 1 передаются в университет, где данные, принимаемые точкой доступа AirGrid 2, через Switch 2 передаются на сервер (рис. 4).

Через Switch 1 к серверу подключается платформа Compact RIO, собирающая информацию на точке ФЭУ и с метеостанции. Антенны AirGrid соединяются между собой протоколом Point to Point. На полигоне датчики RIO, присоединенные к каждой

установке (ВЭУ, солнечный коллектор и пр.), передают по Ethernet данные на Switch 1, которые затем по беспроводному каналу, через свитч транслируются на сервер. Сбор данных с концентратора осуществляется при помощи шасси 1 и повторяет путь до сервера.

Точки доступа AP1 и AP2 предназначены для создания зоны WiFi при помощи CompactRIO с точкой WiFi доступа Ubiquiti Pico Station M, которая обеспечивает свободу перемещений при работе с концентраторами. Через точку доступа (AP3), данные, собираемые с концентратора, передаются на Switch с которого планшеты и ноутбуки получают данные об энергоустановках напрямую из сети через стандартный веб-браузер.

Сервер (4U/E5606/2*2Gb ECC/3*500Gb hotSwap SATA-2/DVDRW/LSI 9240-4I/420 Вт резервируемый) является независимой единицей (расположенной отдельно от серверов УрФУ). На нем реализована конечная обработка, сортировка, архивация, согласование принимаемых данных и отправка их на машины портала УрФУ для размещения в глобальной информационной сети Интернет.

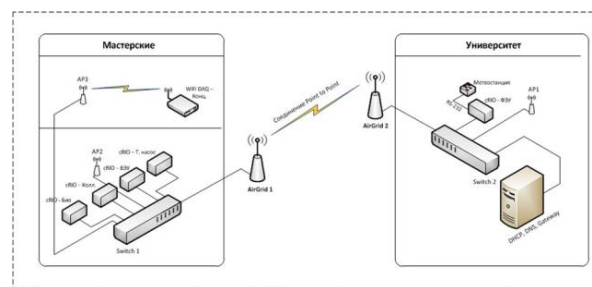


Рис. 4. Схема сбора информации с датчиков экспериментальных стендов

Имеющиеся возможности быстрого получения количественной информации о климатических характеристиках (скорость и направление ветра, солнечное излучение, температура воздуха, влажность и пр.) с синхронным измерением параметров эффективности энергетических установок предоставляет возможности оптимизации конструкций последних, проведение верификационных исследований новых конструкций. В период с 2010 по 2016 гг. УрФУ зарегистрировано более 45 патентов на изобретения новых типов установок возобновляемой энергетики.

Важнейшей задачей освоения и использования является разработка технологий интеграции нерегулярных приходов возобновляемой энергии в существующие системы жизнеобеспечения. Решение данной проблемы осуществляется на натурном полигоне «Энергоэффективный дом» в поселке Растущий Белярского района Свердловской области, где постоянно проживают 8 семей сотрудников университета.

Объект оснащен ветроэнергетическими установками общей мощностью 8 кВт, системами солнечного нагрева воды для горячего водоснабжения, фотоэлектрическими системами с аккумуляторными накопителями энергии с системами синхронизации с сетью МРСК Урала. Для производства тепловой

энергии отрабатываются варианты с теплонасосными установками. Следует отметить, что большая часть используемого оборудования разработана учеными университета и изготовлена в Экспериментально-производственном комбинате УрФУ.



Рис. 5. «Энергоэффективный дом» в зимнее и летнее время

Длительный (свыше 10 лет) опыт эксплуатации позволил разработать схемы оптимального сочетания установок возобновляемой энергетики с электросетевыми и газоснабжающими системами энергоснабжения – существенно (на 30-40 %) снизить потребление объектом традиционных энергоресурсов без снижения качества жизни.

Данный объект широко используется для пропаганды возможностей возобновляемой энергетики, обмена опытом с зарубежными учеными.

Одним из важнейших выводов длительного изучения проблем использования возобновляемых источников энергии для Российских регионов является требование применения их на объектах с высокой энергетической эффективностью (малые потери тепла, высокая эффективность использования электрической энергии, эффективное использование горячей и холодной воды). Накопленный совместно с кафедрой «Энергосбережение» УрФУ опыт полностью подтвердил необходимость реализации комплексного подхода к повышению эффективного использования каждой единицы получаемой энергии.

Создание новых энергетических установок, повышение эффективности существующего оборудования сотен электростанций и котельных, систем пе-

редачи энергии теряют свое значение при низкой эффективности использования ее у сотен тысяч потребителей, к которым она поступает.



Рис. 6. Студенты и аспиранты ряда вузов Великобритании (вверху) и ученые Уральского научно-исследовательского института сельского хозяйства (внизу) на семинарах по обмену опытом использования установок возобновляемой энергетики на Урале

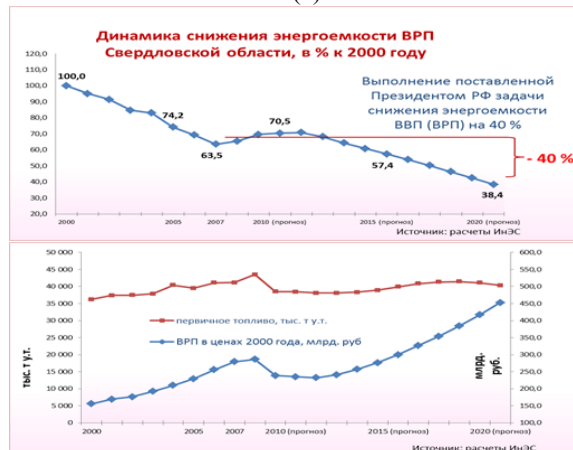
По оценкам кафедры «Энергосбережение» УрФУ и ГБУ Свердловской области «Институт энергосбережения», выполненным под руководством проф. Н.И. Данилова (1945-2015), технический потенциал энергосбережения Свердловской области составляет 17,2 млн. т у. т. На рис. 7 приведены данные по направлениям использования энергоресурсов в отраслях экономики региона и динамика снижения энергоемкости ВРП региона по отношению к 2000 г. [7].

В микрорайоне Академический г. Екатеринбурга специалистами УрФУ совместно с ГБУ СО «Институт энергосбережения» и ЗАО «РСГ-Академическое» проведены комплексные обследования, определены классы энергоэффективности многоквартирных жилых домов (МКЖД). Разработка и реализация рекомендаций по повышению энергоэффективности вновь проектируемых и возводимых зданий обеспечила достижение класса энергетической эффективности МКЖД «В».

Проведенное сотрудниками УрФУ энергетическое обследование зданий всех государственных вузов города Екатеринбурга и крупнейших вузов Уральского федерального округа показало наличие в большинстве сооружений сверхнормативных утечек тепла через ограждающие конструкции.



(a)



(б)

Рис. 7. Потенциал энергосбережения отраслей экономики Свердловской области (а) и динамика снижения энергоёмкости ВРП региона по отношению к 2000 г. (б)

Важнейшее условие – повышение энергетической эффективности объектов, снижение финансовых расходов на экономическую деятельность и, как следствие, на продукцию – должно осознаваться всеми слоями населения и, в первую очередь, руководителями хозяйствующих субъектов. С целью повышения энергетической культуры потребителей энергии УрФУ подготовлено и издано более 50 популярных и специальных книг для пропаганды и развития энергосбережения в быту и повышения энергоэффективности промышленности и ЖКХ (рис. 8).

Организовано преподавание курса «Основы энергосбережения» студентам всех технических специальностей (направлений подготовки) институтов (факультетов) университета; осуществляется работа по масштабному повышению квалификации руководителей промышленности и ЖКХ. За период с 2000 по 2015 год обучение прошли более 30000 специалистов и студентов [8].

Разработан образовательный стандарт УрФУ «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности в промышленности и бюджетной сфере», утвержденный Ученым советом УрФУ в 2012 г. Ведется повышение квалификации специалистов промышленных предприятий Свердловской области и Уральского региона в сфере энергосбережения по Президентской программе повышения квалификации инженерных кадров (2012-2015 гг.).

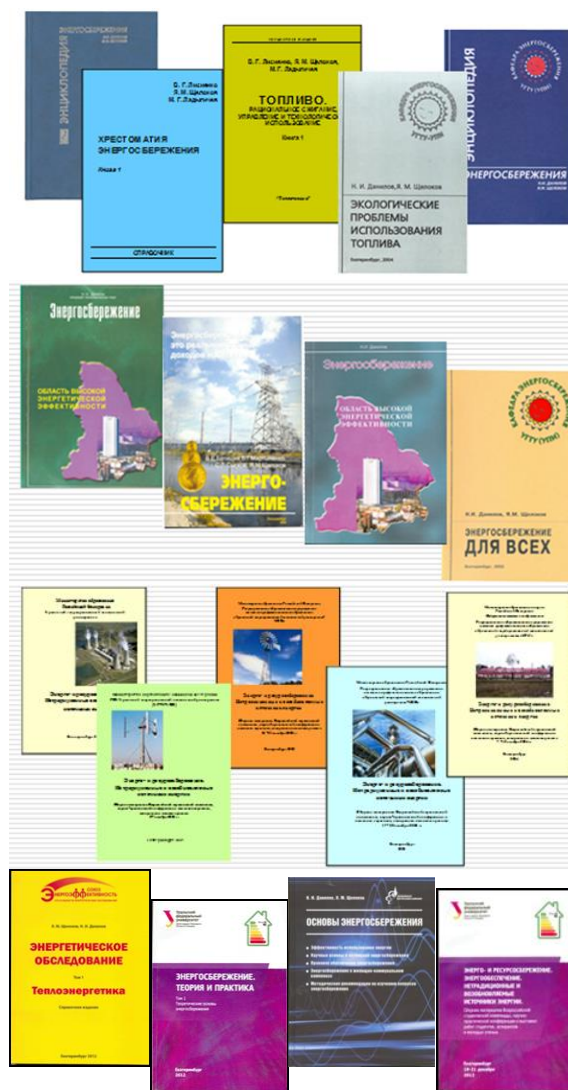


Рис. 8. Некоторые издания УрФУ по проблемам энергосбережения и энергоэффективности

В целях реализации Государственной политики энергосбережения, выявления и государственной поддержки талантливой молодежи, УрФУ в течение 15 лет организует и проводит Всероссийские олимпиады, научно-практические конференции и выставки научно-технического творчества «Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии», в которых принимают участие студенты, аспиранты и молодые ученые десятков вузов страны.



Рис. 9. Выпускники Президентской Программы повышения квалификации инженерных кадров



Рис. 10. Победители и призеры олимпиад, конференций и выставок 2013-2014 гг.

Выпущенные сборники материалов научно-практических конференций, размещенные в Электронном научном архиве УрФУ, пользуются научным интересом в России и зарубежных странах [9].

Эффективность образовательного процесса в области энергосбережения и энергоэффективности достаточно быстро проявляется в первую очередь в вузах – носителями знаний и передовых технологий. По итогам энергетических обследований, выполненных УрФУ, являющимся базовым вузом региона по проблеме энергосбережения, совместно с крупнейшими вузами Свердловской области и Уральского федерального округа проводится аудит энергоэффективности и выполнения программ энергосбережения, показывающий положительное изменение в снижении удельных расходов энергии практически по всем вузам региона (рис. 11, 12).

Научные разработки УрФУ в области энергосбережения и энергоэффективности легли в основу созданной Методологии сквозного энергетического анализа промышленных предприятий и после широкого обсуждения приняты крупнейшей саморегулируемой организацией России в области энергетического обследования – НП «Союз «Энергоэффективность».

За комплекс работ по созданию и реализации проектов в области возобновляемой энергетики и энергоэффективности сотрудники УрФУ награждены Национальной экологической премией РФ имени В.И. Вернадского (2009), медалями Готфрида Вильгельма фон Лейбница (2011), Александра фон Гумбольдта (2013) и Владимира Вернадского (2014) Европейской академии естественных наук (Europäische Akademie der Naturwissenschaften) в г. Ганновере (Германия).

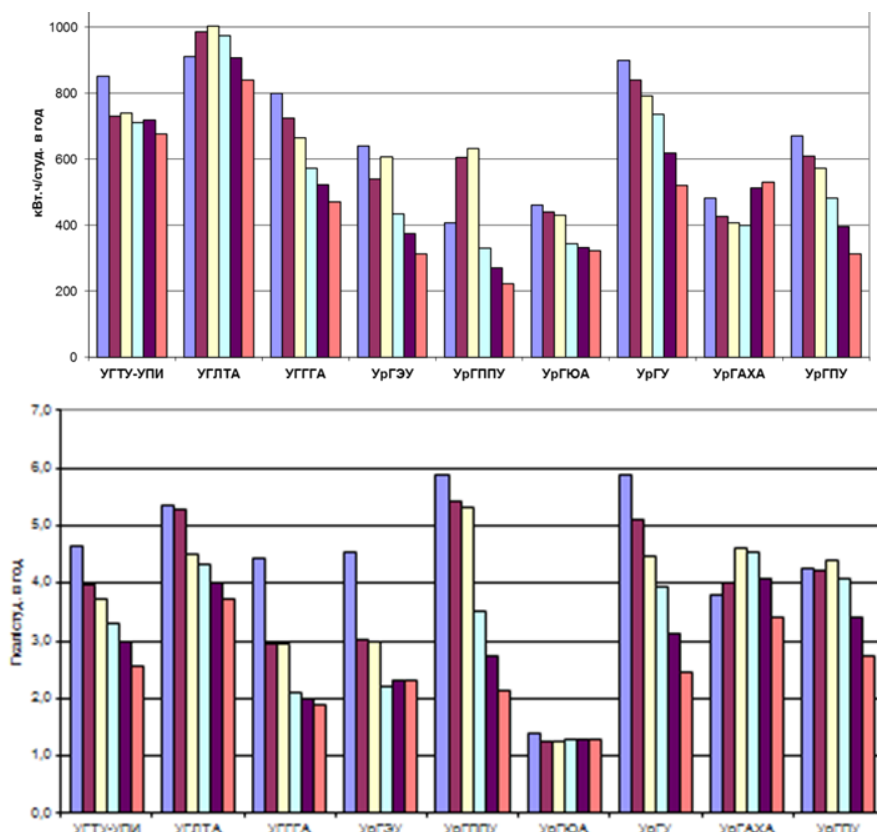


Рис. 11. Изменение за 5 лет удельного энергопотребления электрической (вверху) и тепловой (внизу) энергии на 1 студента в год вузов Свердловской области

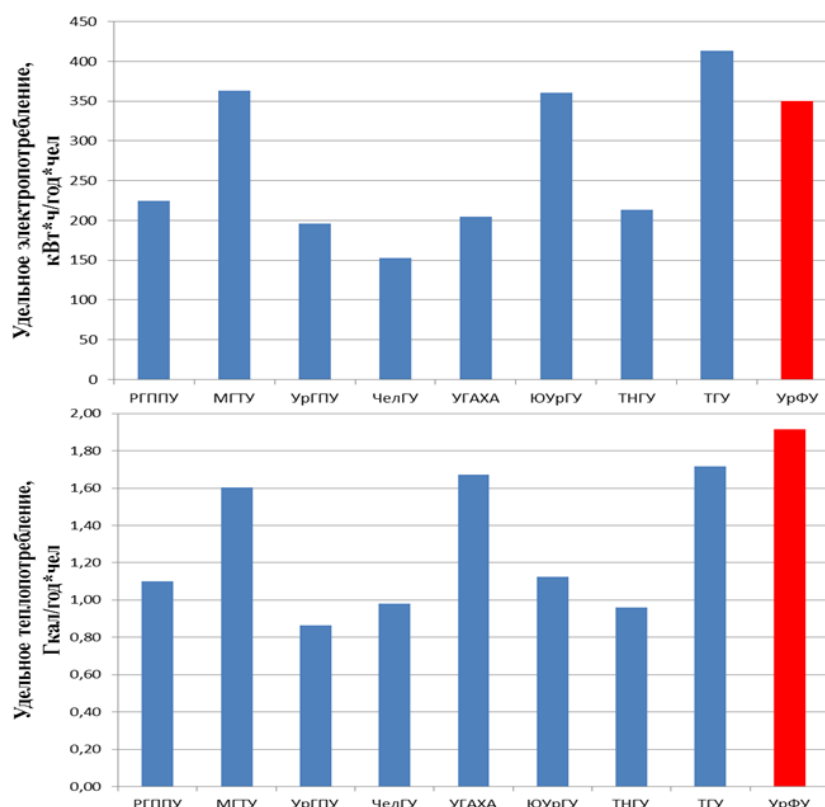


Рис. 12. Достигнутые к 2012 году удельные показатели потребления электрической (вверху) и тепловой (внизу) энергии на 1 студента в год крупнейших вузов УрФО

Это только начало длительного пути – для расширения масштабов работ в России и международного сотрудничества в сфере создания новых энергетических технологий и повышения энергоэффективности в 2014 г. в университете создан Евроазиатский центр возобновляемой энергетики и энергосбережения. Создание центра позволило существенно расширить участие ученых УрФУ в международных конференциях, увеличить число публикаций в зарубежных научных изданиях, привлечь на работу известных и молодых научных работников из Египта, Бангладеш, Ирака, Чехии, Германии; привлечь к обучению в УрФУ по атомной и возобновляемой энергетике, энергосбережению более 20 студентов из развивающихся стран.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Новак А.В. Интервью радиостанции «Эхо Москвы» от 01.10.2016 [Электронный ресурс] <http://minenergo.gov.ru/node/6142>
2. Variable renewable energy sources integration in electricity systems 2016 [Электронный ресурс] <https://www.worldenergy.org/publications/2016/variable-renewable-energy-sources-integration-in-electricity-systems-2016-how-to-get-it-right>
3. Energy Technology Perspectives 2016 - Executive Summary – Russian Version [Электронный ресурс] <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/energy-technology-perspectives-2016-executive-summary-russian-version.html>
4. World Energy Outlook 2015 – Executive Summary – Russian version [Электронный ресурс]
5. Носов Ю.В., Смышляева О.Ю., Ташлыков О.Л., Щеклеин С.Е. Обеспечение экологической безопасности при длительной эксплуатации реакторов на быстрых нейтронах на примере Белоярской АЭС // Альтернативная энергетика и экология. 2012. № 4. С. 64-68.
6. Потенциал возобновляемых источников энергии в России. Существующие технологии / Российско-Европейский Технологический Центр [Электронный ресурс] www.technologycentre.org
7. Danilov N., Silin V., Dobrodey V., Popov V. Energy problems of the rational use of the economic potential of the region. // Energy Production and Management in the 21st Century. The Quest for Sustainable Energy: First International Conference (23-25 April 2014, Ekaterinburg). Southampton, Boston: WIT Press, 2014. Vol. 1. P. 419-423.
8. Baldin, V.U., Danilov, N.I., Khudyakova G.I. The system of human resource development in energy saving in the Ural region // Energy Production and Management in the 21st Century. The Quest for Sustainable Energy: First International Conference (23-25 April 2014, Ekaterinburg). Southampton, Boston: WIT Press, 2014. Vol. 2. P. 1205-1211.
9. Материалы Уральского энергетического института по тематике «Энергосбережение», «Энергоэффективность», «Возобновляемые источники энергии» / Электронный научный архив УрФУ [Электронный ресурс] <http://elar.urfu.ru/handle/10995/27030>

УДК 621.039

*О. Л. Ташлыков, С. Е. Щеклеин, А. И. Карпенко, А. И. Бельтюков*Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина,
г. Екатеринбург, Россия*А. М. Тучков, Д. М. Химчак*

Белоярская АЭС, г. Заречный Свердловской обл., Россия

ПОДГОТОВКА СПЕЦИАЛИСТОВ ДЛЯ ИННОВАЦИОННЫХ ЭНЕРГОБЛОКОВ АЭС (НА ПРИМЕРЕ ЭНЕРГОБЛОКА БН-800)

Квалификация персонала, его компетентность и натренированность относятся к важнейшим факторам предотвращения нарушений ядерной и радиационной безопасности. Основным источником квалифицированных кадров для атомной энергетики являются образовательные учреждения и, в первую очередь, высшие учебные заведения. Уникальность технологии быстрых реакторов требует специфического подхода к подготовке специалистов и специальной материально-технической базы. В докладе обобщен опыт подготовки специалистов на кафедре «Атомные станции и возобновляемые источники энергии» УрФУ для АЭС с реакторами на быстрых нейтронах БН-600, БН-800.

Ключевые слова: ядерная безопасность; реактор на быстрых нейтронах; оперативный персонал; аналитический тренажер; научно-исследовательская работа; системный подход к обучению.

O. L. Tashlykov, S. E. Shcheklein, A. I. Karpenko, A. I. Beltukov

Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

A. M. Tuchkov, D. M. Khimchak

Beloyarskaya NPP, Zarechny, Sverdlovsk reg., Russia

SPECIALIST TRAINING FOR INNOVATIVE NPPS (ON THE EXAMPLE OF BN-800)

The qualification, competence and training of the personnel are the most important factors in preventing the infringements of the nuclear and radiation safety. The main source of qualified personnel for the nuclear industry is educational institutions and, above all, higher education institutions. The uniqueness of the fast reactor technology requires a specific approach to training and a special material and technical base. The report summarizes the experience of the specialists training of the department "Nuclear power plants and renewable energy sources", UrFU, for nuclear power plants with fast reactors BN-600 and BN-800.

Key words: nuclear safety; fast neutron reactor; operating personnel; analytical simulator; research work; a systematic approach to training.

ВВЕДЕНИЕ

Социальная приемлемость атомной энергетики может быть обеспечена только при безусловном соответствии атомных станций установленным требованиям к их безопасности.

При этом безопасность ядерной установки в соответствии с «Основополагающими принципами безопасности № SF-1» МАГАТЭ должна обеспечиваться и поддерживаться с помощью эффективной системы управления, важнейшей частью которой являются человеческие ресурсы. Как показывает многолетняя практика, квалификация персонала, его компетентность и натренированность относятся к важнейшим факторам предотвращения нарушений ядерной и радиационной безопасности.

Подготовка специалистов для атомной энергетики имеет ряд особенностей, связанных с высоким технологическим уровнем отрасли, потенциальной опасностью ядерных технологий, значительным временем обучения. Для достижения, улучшения и поддержания высокого уровня знаний и навыков персонала и качества его работы должен использоваться систематический подход к обучению.

Политика Госкорпорации «Росатом» в области управления персоналом определяется амбициозными задачами, поставленными перед атомной отраслью России. При этом важная роль в развитии атомной энергетики России и долгосрочном обеспечении отрасли ядерным топливом отводится реакторам на быстрых нейтронах, базой развития которых является Белоярская АЭС. Более 36 лет успешно эксплуатируется БН-600, на блоке № 4 с реактором БН-800 осуществляется

этап освоения уровня мощности 100 % от номинальной, разрабатывается проект БН-1200 [1]. Одним из основных условий успешной реализации данного инновационного направления развития атомной энергетики является опережающая подготовка высококвалифицированных специалистов по эксплуатации и обслуживанию систем и оборудования энергоблоков АЭС с реакторами на быстрых нейтронах.

Основным источником квалифицированных кадров для атомной энергетики являются образовательные учреждения и, в первую очередь, высшие учебные заведения. Чтобы обеспечить подготовку необходимого количества высококлассных специалистов, способных приступить к работе сразу после окончания учебного заведения без их «подгонки» к требованиям конкретного предприятия, необходима тесная интеграция образовательных учреждений и предприятий.

Современные системы управления, обеспечивающие безопасность АС, предполагают вовлечение в этот процесс также поставщиков. Поэтому важно также обучение специалистов предприятий и организаций, занятых в сооружении АС, поставках оборудования и т.д., основным вопросам обеспечения безопасности в атомной энергетике.

1. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА

Учебно-материальные и интеллектуальные ресурсы

Кафедра «Атомная энергетика» (с 2012 года – «Атомные станции и возобновляемые источники энергии») была основана в 1962 году в Уральском политехническом институте (ныне Уральский федеральный университет) в связи со строительством Белоярской АЭС. Сооружение энергоблока № 3 с реактором БН-600 вызвало необходимость организации подготовки выпускников кафедры для эксплуатации быстрых реакторов. Уникальность технологии быстрых реакторов потребовала специфического подхода к подготовке специалистов и специальной материально-технической базы, создание которой проходило при активной поддержке руководства Белоярской АЭС и концерна Росэнергоатом.

Значительным вкладом в модернизацию учебно-материальной базы в связи со строительством энергоблока БН-800 стало участие кафедры «Атомная энергетика» в реализации Федеральной инновационной образовательной программы «Формирование профессиональных компетенций выпускников на основе научно-образовательных центров для предприятий атомно-энергетического комплекса Уральского региона» в 2007-2008 годах. Было приобретено и изготовлено уникальное учебно-тренировочное оборудование, не имеющее отечественных и зарубежных аналогов. Для его изготовления потребовалась разработка специалистами кафедры, Белоярской АЭС, а также других организаций специальных технических условий.

В связи с особой значимостью для опережающей подготовки специалистов для вновь проектируемых энер-

гоблоков виртуальных технологий обучения, для визуализации учебного процесса была разработана 3D-модель энергоблока с реактором БН-800. Модель позволяет изучать компоновочные решения энергоблока в любых вертикальных и горизонтальных сечениях. Кроме того, объемные модели являются эффективным средством снижения дозовых нагрузок за счет виртуального изучения работниками недоступного или ограниченно доступного по причине радиационной обстановки оборудования и систем АЭС перед проведением работ [2].

На основе этой модели изготовлен макет энергоблока в масштабе 1:100 с наиболее «информативным» разрезом по машинному залу и реакторному отделению, позволяющим показать максимально возможное количество оборудования и систем энергоблока.

Для повышения эффективности обучения в процессе сооружения энергоблока БН-800 создавалась фото-библиотека с изображениями оборудования, устройств, процессов сборки, монтажа и т. п. Фотографии являются одним из инструментов оптимизации радиационной защиты на этапе планирования работ в зоне контролируемого доступа, т. к. позволяют получить доступ к изображениям оборудования и рабочих зон, недоступных во время работы реактора [3].

Особую значимость для опережающей подготовки эксплуатационного персонала имеет аналитический тренажер БН-800, созданный НТЦ «Моделирующие системы» (г. Обнинск), позволяющий моделировать различные эксплуатационные режимы энергоблока, в том числе переходные и аварийные (рис. 1).



Рис. 1. Занятия на аналитическом тренажере БН-800

По вновь организованным курсам, посвященным эксплуатации и обслуживанию реакторных установок на быстрых нейтронах, ведущими специалистами кафедры были разработаны электронно-образовательные ресурсы (демонстрационные материалы, мультимедийные лекции и т. д.). Особое значение электронные ресурсы приобретают при подготовке специалистов для обслуживания радиоактивного оборудования, так как позволяют изучать конструкции, последовательность операций разборки и сборки и т. д. в условиях учебных аудиторий без опасности облучения [3].

Для поддержки учебного процесса были подготовлены и изданы учебные пособия по вопросам эксплуа-

тации, технического обслуживания и ремонта, обеспечения безопасности АЭС с реакторами на быстрых нейтронах. В 2013 году в результате масштабной совместной работы ведущих специалистов кафедры «Атомные станции и ВИЭ» УрФУ и Белоярской АЭС при поддержке Департамента канальных и быстрых реакторов ОАО «Концерн Росэнергоатом» было издано учебное пособие «Атомные электростанции с реакторами на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем» в двух томах.

Для повышения эффективности подготовки специалистов, максимально адаптированных к требованиям предприятия, на Белоярской АЭС в 1981 г. был организован филиал кафедры «Атомная энергетика», который работает по ежегодно утверждаемому плану. В филиале кафедры ведущими специалистами Белоярской АЭС, имеющими учёные степени и звания, читаются курсы «Введение в специальность», «Принципы обеспечения безопасности АС», «Эксплуатационные режимы АЭС», проводится дипломное проектирование. Кроме того, филиал принял на себя значительный объем работ по проведению производственных и преддипломных практик студентов кафедры на Белоярской АЭС.

Важной частью системы управления персоналом в атомной энергетике является целенаправленная подготовка специалистов по техническому обслуживанию и ремонту, которая была начата на кафедре «Атомные станции и ВИЭ» УрФУ в 1989 г. в соответствии с договором между университетом и концерном «Росэнергоатом». За это время создана полноценная учебно-тренировочная база, оснащенная учебными стендами, демонстрационными макетами и схемами, образцами техники для дистанционного контроля и ремонта оборудования АЭС, лабораторными стендами и позволяющая проводить необходимые практические и лабораторные занятия (рис. 2) [4].



Рис. 2. Занятия в учебно-тренировочном комплексе

Концепция развития учебно-тренировочного комплекса определялась Департаментом по ремонту и техническому обслуживанию АЭС концерна «Росэнергоатом» [5].

Научно-исследовательская работа

Обеспечение высокой эффективности подготовки специалистов для атомной энергетики должно осуществляться по принципу «Обучение через науку», подразумевающему организацию образовательного процесса на базе решения реальных задач атомной энергетики с реакторами на быстрых нейтронах. Этот процесс должен включать в себя изучение научно-технических проблем, разработку путей их решения, комплекс необходимых научно-исследовательских работ, создание опытного образца, в идеальном случае – возможное внедрение в производство.

Направление научно-исследовательской работы должно соответствовать профилю предприятия или организации, где студенты проходят производственную практику, начиная с третьего курса, и куда планируют распределиться для дальнейшей работы. Итогом является дипломное проектирование и реальный проект.

Привлечение студентов к выполнению реальных научно-исследовательских работ экспериментального и аналитического характера, участие в реальных научных событиях и совместных разработках способствуют ускорению адаптации выпускников в коллективе Белоярской АЭС, создают базу для продолжения исследований и подготовки диссертационных работ.

Систематический подход к обучению

Для реализации систематического подхода к обучению персонала, позволяющего достичь высокого уровня знаний и навыков, поддерживать и повышать его, обеспечивать качество его работы, должны использоваться различные формы организации обучения (например, повышение квалификации, профессиональная переподготовка). При этом необходимо ориентироваться на текущие потребности предприятия, возможность обучения без отрыва от производства, минимизацию расходов на командировки в отдаленные учебные центры.

Потребность в различных формах обучения может значительно изменяться в зависимости от этапа жизненного цикла энергоблока АЭС. Так, в связи с сооружением энергоблока с БН-800 потребность в специалистах значительно возросла и потребовала поиска новых форм обучения, в том числе профессиональной переподготовки специалистов с непрофильным техническим образованием.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Кафедра «Атомная энергетика» является одной из специализированных кафедр, созданных в свое время для обеспечения основной потребности в специалистах строящихся вблизи вузов АЭС. Высокая ответственность за обеспечение безопасности ядерной установки АЭС накладывает жесткие квалификационные требования к эксплуатационному персоналу, обслуживающему реакторную установку. Обязательным условием получения разрешения Ростехнадзора на право ведения работ в области использования атомной энергии

является наличие образования по специальности 140404 «Атомные электростанции и установки», 141403 «Атомные станции. Проектирование, эксплуатация, инжиниринг», подготовка по которым ведется на кафедре «Атомная энергетика» УрФУ. В общей потребности атомных станций в молодых специалистах доля этих специальностей, являющихся базовыми, составляет примерно 30 %.

Порядок и обязательные процедуры, необходимые для получения разрешения, достаточно подробно освещены в «Положении о порядке выдачи разрешений Госатомнадзором России на право ведения работ в области использования атомной энергии работникам объектов ядерного топливного цикла» РД-05-17-2001.

Кафедра «Атомные станции и ВИЭ» имеет современную, постоянно совершенствующуюся учебно-материальную и тренажерную базу, позволяющую обеспечивать качественную подготовку специалистов для атомной энергетики с реакторами на быстрых нейтронах.

Фундаментальная подготовка студентов на кафедре позволяет осуществлять их профессиональную деятельность во многих цехах и подразделениях АЭС. Так, среди 713 выпускников УрФУ, работающих на БАЭС, более четверти имеют специальность 140404 «Атомные электрические станции и установки». Кроме того, с 2012 г. по этой же специальности прошли профессиональную переподготовку 122 специалиста БАЭС, имеющих высшее техническое образование.

Важность роли вузов, расположенных вблизи АЭС, в обеспечении атомной энергетики специалистами подчеркивают данные, приведенные на рис. 3. В последние пять лет Уральский федеральный университет обеспечивал более трети в общем наборе специалистов Белоярской АЭС (например, в 2012 году – 107 человек, или 39 % от общего приема).

Близкое географическое расположение Белоярской АЭС и УрФУ (примерно 50 км, время в пути не более одного часа) создает уникальные возможности по оптимизации процесса подготовки специалистов. Имеется возможность проведения практических занятий со студентами на БАЭС, посещения занятий работниками БАЭС в университете без проживания в Екатеринбурге или ежедневного выезда преподавателей университета в Заречный. Повышается возможность интеграции специалистов атомной станции в процесс обучения студентов кафедры в университете.

Плодотворное сотрудничество кафедры с БАЭС реализуется также в направлении подготовки кадров высшей квалификации из работников БАЭС через аспирантуру и соискательство в УрФУ. Интеллектуальный потенциал вуза привлекается к обобщению накопленного опыта эксплуатации, подготовке на этой основе монографий и учебных пособий по проблемам АЭС с реакторами на быстрых нейтронах.

Тематика дипломных проектов студентов кафедры соответствует месту будущей работы. Это приводит к сокращению сроков адаптации выпускников на предприятии. В настоящее время развивается практика устройства студентов на рабочие должности в процессе прохождения производственной (преддипломной) практики на предприятии, сдача экзаменов на должность и т. д.

Обязательной составляющей процесса подготовки специалистов на кафедре «Атомные станции и ВИЭ» является научно-исследовательская работа студентов под руководством ведущих специалистов кафедры. Важным условием успешной реализации этого процесса является сотрудничество кафедры с Белоярской АЭС и другими предприятиями и организациями Росатома.

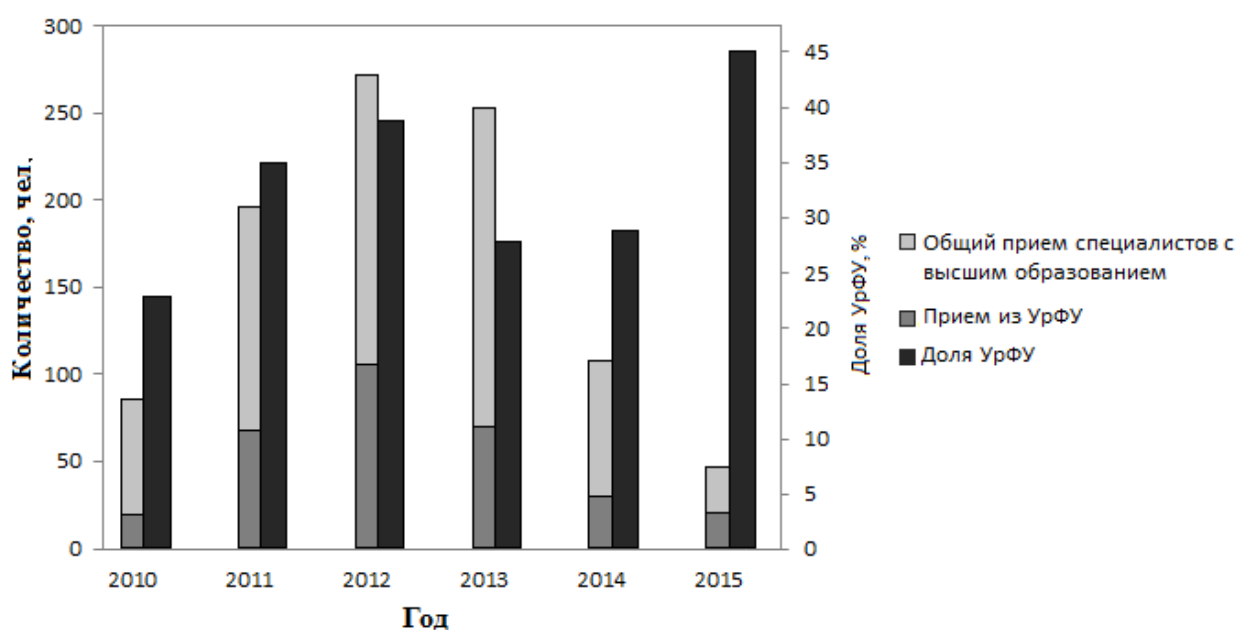


Рис. 3. Прием специалистов с высшим образованием на Белоярскую АЭС



Рис. 4. Выпуск первой группы профпереподготовки АЭС-1 (вручение дипломов 03.08.2012 г.)

Показателем эффективности обучения через решение реальных научно-технических задач являются традиционно занимаемые студентами кафедры призовые места в ежегодном конкурсе научных работ «Знания молодых ядерщиков – атомным станциям», проводимом ОАО «Концерн Росэнергоатом». Основная часть работ посвящена решению актуальных проблем Белоярской АЭС и имеет прикладное значение. Так, работы по утилизации низкопотенциальной теплоты в паротурбинном контуре БН-600, моделированию процессов замораживания натрия при проведении работ на системах, выполненные за последние два года, заняли первые места. Многие из лауреатов этого конкурса работают сейчас на третьем и четвертом блоках Белоярской АЭС [6 – 8].

Кафедра «Атомные станции и ВИЭ» УрФУ имеет многолетний опыт организации обучения сотрудников БАЭС и других организаций, связанных с сооружением и эксплуатацией объектов использования атомной энергии (ОИАЭ), по программам повышения квалификации (современные требования по обеспечению безопасности ОИАЭ, новые технологии переплавки радиоактивных отходов, оптимизация работ по демонтажу радиоактивного оборудования и т. д.).

Возросшая в связи с сооружением энергоблока с БН-800 потребность в специалистах потребовала поиска новых форм обучения. С 2012 года для работников Белоярской АЭС реализуется программа профессиональной переподготовки на базе высшего непрофильного технического образования. Теоретическая часть учебного процесса проходит в оборудованных специализированных аудиториях ЛПФО БАЭС, для проведения практических занятий слушатели выезжают в УрФУ. В качестве преподавателей привлекаются ведущие специалисты УрФУ, Белоярской АЭС,

Ростехнадзора. Срок обучения составляет 12-13 месяцев, в завершение процесса обучения слушатели сдают государственный экзамен и защищают дипломный проект. Темы проектов выбираются в соответствии с направлением производственной деятельности выпускника. В настоящее время закончили обучение по данной программе более ста работников Белоярской АЭС (рис. 4 – 6).

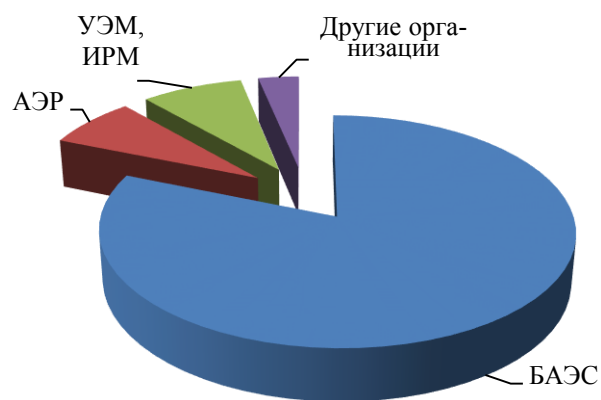


Рис. 5. Распределение по месту работы (предприятия и организации) специалистов, прошедших профпереподготовку

Эффективность данной формы обучения подтвердили результаты партнерской проверки Белоярской АЭС Московским центром Всемирной ассоциации операторов (BAO) АЭС (WANO) в сентябре 2012 г. По направлению «Подготовка и квалификация персонала», «Подходы к обучению персонала» была отмечена положительная практика:

- на площадке Белоярской АЭС в сотрудничестве с Уральским федеральным Университетом существует

система профессиональной переподготовки по программе «Атомные электрические станции и установки»;

- на других АЭС система профессиональной переподготовки реализована путем выездного обучения с отрывом от производства;
- существующая на Белоярской АЭС система позволяет осуществлять переподготовку с минимальными издержками для производства.

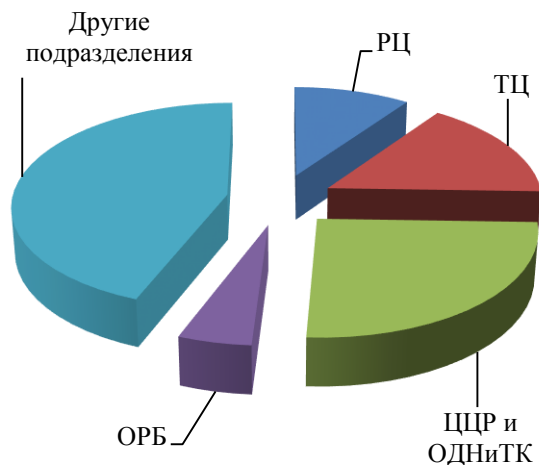


Рис. 6. Распределение по месту работы (по цехам Белоярской АЭС) специалистов, прошедших профпереподготовку

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основной контингент набора молодых специалистов в общий прием на АЭС обеспечивают региональные вузы. Многолетнее плодотворное взаимодействие кафедры «Атомные станции и ВИЭ» с Белоярской АЭС позволяет значительно повысить эффективность и качество подготовки кадров, приблизить подготовку молодых специалистов к требованиям предприятия, что значительно сокращает период адаптации. Тесная связь между вузом и Белоярской АЭС позволяет непрерывно корректировать подготовку при изменении потребностей с помощью самих же работодателей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Носов Ю.В., Смышляева О.Ю., Ташлыков О.Л., Щеклеин С.Е. Обеспечение экологической безопасно-

сти при длительной эксплуатации реакторов на быстрых нейтронах на примере Белоярской АЭС // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология». 2012. № 4. С. 64-68.

2. Ташлыков О.Л., Щеклеин С.Е., Борисова Е.В. Использование 3D-технологий при подготовке специалистов для инновационного энергоблока Белоярской АЭС с реактором на быстрых нейтронах БН-800 // Дистанционное и виртуальное обучение. 2010. № 10. С. 28-37.

3. Ташлыков О.Л., Щеклеин С.Е. Виртуальные технологии обучения в решении проблемы снижения обучаемости ремонтного персонала // Дистанционное и виртуальное обучение. 2010. № 8. С. 48-57.

4. Щеклеин С.Е., Ташлыков О.Л. Подготовка ремонтного персонала для существующих и перспективных реакторов на быстрых нейтронах / Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики // Тезисы докладов седьмой международной научно-технической конференции 26-27 мая 2010 г. – Москва, 2010. С. 121.

5. Щеклеин С.Е., Ташлыков О.Л., Велькин В.И., Шастин А.Г., Дементьев В.Н., Маркелов Н.И., Сорокин Ю.И. Опыт сотрудничества концерна «Росэнергоатом» и Уральского государственного технического университета в области подготовки специалистов для технического обслуживания и ремонта оборудования АЭС // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2004. №3. С. 121-129.

6. Ташлыков О.Л., Наумов А.А., Щеклеин С.Е. Моделирование процесса замораживания натрия в трубопроводах с целью оптимизации ремонта реакторных установок на быстрых нейтронах // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. 2013. № 2. С. 21-26.

7. Ташлыков О.Л., Ковин И.В., Кокорин В.В. Утилизация низкопотенциальной теплоты АЭС с реактором на быстрых нейтронах с использованием теплового насоса // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология». 2012. № 3. С. 22-25.

8. Ташлыков О.Л., Толмачев Е.М., Семенов М.Ю., Сапожников Б.Г. Снижение тепловых нагрузок АЭС на окружающую среду путем использования тепловых насосов в схеме основного конденсатора паротурбинной установки // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология». 2012. № 3. С. 16-21.

УДК 621.039

О. Л. Ташлыков, С. Е. Щеклеин, Г. П. Титов, Д. А. Носов

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина,
г. Екатеринбург, Россия

А. М. Тучков

Белоярская АЭС, г. Заречный Свердловской обл., Россия

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОГРАММНО-ТРЕНАЖЕРНЫХ СРЕДСТВ ПРИ ПОДГОТОВКЕ СПЕЦИАЛИСТОВ ДЛЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Кафедра «Атомные станции и возобновляемые источники энергии» УрФУ имеет специальную учебно-материальную базу по подготовке специалистов для АЭС с реакторами на быстрых нейтронах. В учебном процессе активно используются программно-тренажерные средства (расчетные программы ГЕФЕСТ, Joker, Syntes, аналитический тренажер БН-800 и другие). При проведении научно-исследовательских работ студенты используют различные системы автоматизированного моделирования. В статье рассмотрены структура и элементы тренажерного комплекса БН-800, обеспечивающего тренировки по управлению технологическими процессами реакторного, турбинного отделений энергоблока. Описаны способы управления технологическими процессами, средства контроля и визуализации протекания процессов в реакторе и системах АЭС. Рассмотрено использование аналитического тренажера на примере выполнения лабораторной работы «Маневрирование мощностью реакторной установки БН-800», в которой изучаются режимы управления мощностью реакторной установки (РУ) в диапазоне 100–80–100 % от номинальной.

Ключевые слова: ядерная энергетика; ядерная энергетическая система; реактор на быстрых нейтронах; подготовка персонала; аналитический тренажер.

O. L. Tashlykov, S. E. Shcheklein, G. P. Titov, D. A. Nosov

Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

A. M. Tuchkov

Beloyarskaya NPP, Zarechny, Sverdlovsk reg., Russia

USING THE SOFTWARE SIMULATORS FOR TRAINING THE NUCLEAR ENERGY SPECIALISTS

"Nuclear power plants and renewable energy sources" department of UrFU has special training facilities for the specialists training for innovative nuclear reactors on fast neutrons. Computer simulators such as GEFEST, Joker, Syntes calculation programs, BN-800 analytical simulator and others are widely used in the educational process. Students use a variety of computer-aided simulation systems in carrying out research projects. The article describes the structure and the elements of BN-800 training complex, which provides the training of the unit's reactor and turbine technological processes control. The methods of technological processes control, monitoring and visualization in the nuclear reactor and other NPP systems are described. The use of the analytical simulator is considered on the example of the laboratory work "Maneuvering of the reactor BN-800 power", which studies the reactor plant power control modes.

Key words: nuclear power industry; nuclear power system; fast breeder reactor; staff training; analytical simulator.

ВВЕДЕНИЕ

Ядерная энергетика должна обладать гарантированной безопасностью, экономической устойчивостью и конкурентоспособностью, отсутствием ограничений по сырьевой базе на длительный период времени, экологической устойчивостью (малоотходностью). Этим условиям могут удовлетворить ядерные энергетические системы (ЯЭС) с реакторами-размножителями на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем [1].

Россия обладает многолетним опытом в области сооружения и эксплуатации реакторов на быстрых

нейтронах с натриевым теплоносителем, базой развития которых является Белоярская АЭС. Более 36 лет успешно эксплуатируется БН-600, пущен энергоблок с реактором БН-800. В настоящее время разрабатывается проект реактора БН-1200, который может быть использован в ЯЭС четвертого поколения с замыканием ЯТЦ [2].

Одним из основных условий успешного развития данного направления атомной энергетики является подготовка высококвалифицированных специалистов по эксплуатации и обслуживанию систем и оборудования энергоблоков АЭС с реакторами на быстрых нейтронах [3]. Использование программно-тренажерных

средств является обязательной частью образовательного процесса, позволяющей эффективно влиять на качество подготовки специалистов.

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА

Кафедра «Атомные станции и возобновляемые источники энергии» была основана в 1961 году в Уральском политехническом институте (ныне Уральский федеральный университет) в связи со строительством Белоярской АЭС. Сооружение энергоблока № 3 с реактором БН-600 актуализировало необходимость специализации подготовки выпускников кафедры для эксплуатации быстрых реакторов. Уникальность технологии быстрых реакторов потребовала специфического подхода к подготовке специалистов и специальной материально-технической базы, создание которой проходило при активной поддержке руководства Белоярской АЭС и концерна Росэнергоатом [4 – 5].

Многолетний опыт по подготовке специалистов для атомной энергетики определил необходимость активного применения программно-тренажерных средств обучения. На кафедре «Атомная энергетика» УрФУ создан комплекс специфических программно-тренажерных средств, включающий в себя:

- аналитические симуляторы ТОМАС-1А и ТОМАС-2, позволяющие моделировать нормальные, переходные и аварийные режимы работы энергоблоков с ВВЭР-1000 и РБМК-1000 соответственно [6];
- расчетный код КОРСАР, предназначенный для расчетных анализов нестационарных процессов в контурах АЭС с ВВЭР в стационарных, переходных и аварийных режимах;
- комплекс программ ГЕФЕСТ для нейтронно-физических расчетов реактора типа БН в многогрупповом диффузионном приближении в трехмерной гексагональной геометрии;
- комплекс программ Joker для расчетного обоснования безопасной эксплуатации АЭС с реактором БН-600;
- программный комплекс Syntes для нейтронно-физического и теплогидравлического расчета быстрых реакторов;
- аналитический тренажер БН-800.

Для повышения эффективности обучения активно реализуется принцип «Обучение через науку», подразумевающий организацию образовательного процесса на базе решения реальных задач атомной энергетики. При выполнении научно-исследовательских работ, дипломных проектов на кафедре используются различные стандартные системы автоматизированного моделирования [7, 8]. В проводимых совместно со специалистами АО «Институт реакторных материалов» с 2011 г. расчетно-экспериментальных исследованиях по оптимизации состава гомогенных радиационно-защитных материалов используются высокоточные расчетные коды, реализующие метод Монте-Карло [9, 10]. При реализации сложных математических задач (например, использование метода динамического программирования для маршрутной оптимизации работ в нестационарных радиационных полях [11]), привлекаются специалисты и вычислительные

ресурсы Института механики и математики УрО РАН [12].

Учитывая важность тренажерной подготовки специалистов для обеспечения безопасности АЭС, в 2008 г. кафедра приобрела аналитический тренажер БН-800 (АТ БН-800), разработанный ЭНИМЦ «Моделирующие системы» (г. Обнинск), позволяющий моделировать различные эксплуатационные режимы энергоблока, в том числе переходные и аварийные (рис. 1).

Тренажерный комплекс состоит из пяти рабочих станций, двух серверов (основного и резервного), принтера и сетевого коммутатора. Каждая станция включает два графических монитора, клавиатуру, мышь. Одна станция является рабочим местом инструктора, остальные – рабочими местами оператора. С рабочего места инструктора осуществляется управление работой на тренажере, включая задание отказов и воздействия «удаленного» управления (по месту). Станция оператора имитирует автоматизированное рабочее место (АРМ) оперативного персонала энергоблока.



Рис. 1. Занятия на аналитическом тренажере БН-800

Информация о состоянии технических средств блока представляется на экранах мониторов. Управление техническими средствами и технологическим процессом производится при помощи мыши. Все механизмы (насосы, регуляторы, арматура и т. д.) управляются при помощи пиктограмм и кнопок, расположенных на всплывающих окнах управления.

Значения технологических параметров в цифровой форме, состояние насосов, регуляторов, арматуры и т. д. представляются оператору на графических форматах, вызываемых на экран при помощи системы навигации. С этих форматов оператор управляет техническими средствами блока. Для наблюдения и изучения развития процессов используются графики (рис. 2).

В нижней части экрана расположена панель навигации с кнопками системы навигации, кнопками-сигналами и кнопками-переходами. Оператор может вызвать обобщенный формат, формат сигналов аварийной, предупредительной и технологической сигнализации; предыдущий формат и т.д. на любой монитор тренажера. Формат «Сигнализация» предназначен для своевременной регистрации и оповещения оператора о любых неисправностях и отклонениях в работе блока. Все сигналы по степени важности разбиты на три уровня: аварийная, предупредительная и технологическая сигнализации.

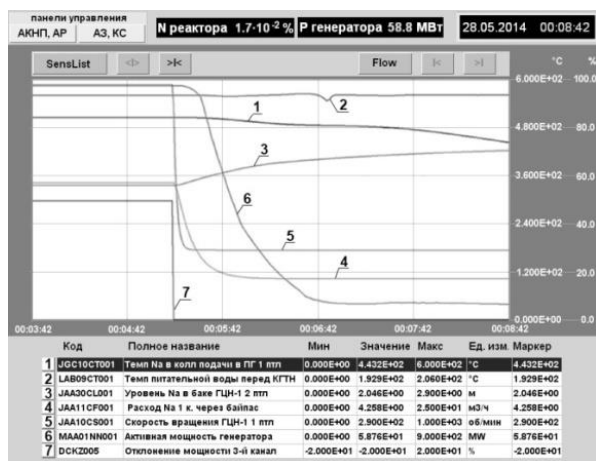


Рис. 2. Изменение параметров при срабатывании быстродействующей аварийной защиты

Ключевым графическим форматом является обобщенный формат (рис. 3), с которого осуществляется доступ ко всем остальным графическим форматам.

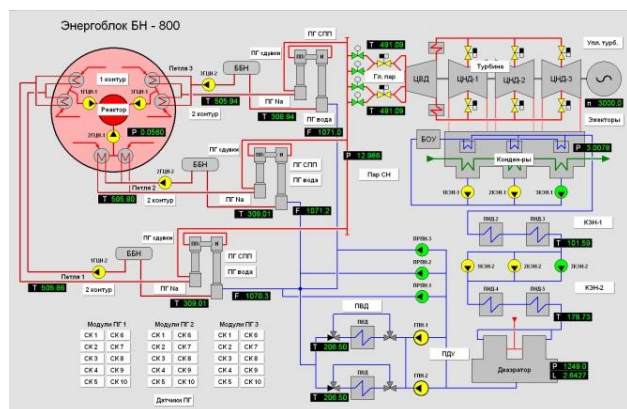


Рис. 3. Обобщенный графический формат

Моделирование технологических процессов осуществляется с помощью моделей натриевых контуров, турбоустановки и т. д. Тренажер имеет математические модели, имитирующие в реальном времени все нейтронно-физические, теплофизические и тепло-гидравлические процессы энергоблока, а также всю логику систем управления и автоматики.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В 2008-2015 гг. совместно со специалистами Белоярской АЭС на кафедре «Атомные станции и ВИЭ» были разработаны методические указания по проведению лабораторных работ по основным направлениям подготовки персонала.

Тренажер обеспечивает:

- подготовку, переподготовку и поддержание квалификации оперативного персонала и персонала инженерной поддержки АЭС;
- тренировки по управлению технологическим процессом реакторного, турбинного и электротехнического отделений энергоблока и контроль за его состоянием в нормальных и аварийных режимах;
- моделирование переходных процессов и поиск корневых причин аварийных ситуаций, имевших место на АЭС;

- проверку правильности действий персонала в переходных режимах, описанных в эксплуатационных инструкциях;
- формирование у персонала понимания физических процессов в управляемом объекте;
- верификацию симптомно-ориентированных инструкций;
- разработку учебно-методического обеспечения.

В настоящее время разрабатываются методические указания по выполнению следующих лабораторных работ на тренажере:

- перекомпенсация компенсирующих органов СУЗ;
- метод относительного взвешивания (метод сравнения);
- отключение одной из теплоотводящих петель;
- моделирование нестационарного режима, связанного с несанкционированным извлечением стержней СУЗ.

Рассмотрим использование АТ БН-800 на примере лабораторной работы «Маневрирование мощностью установки».

Целью работы является изучение режима маневрирования мощностью реакторной установки (РУ) БН-800. В реальном времени необходимо снизить мощность РУ до 80 %, а затем поднять её до номинального уровня с шагом в 5 %.

Ход выполнения работы включает в себя проведение подготовительных перед снижением мощности реактора операций, заключающихся в разгрузке ПВД 1, 2 по пару до снижения температуры питательной воды после ПВД с величины 206 °C до 190-195 °C. Разгрузка ПВД по пару производится поочередным прикрытием задвижек подачи пара отбора от ТГ. Скорость снижения температуры питательной воды при этом не должна превышать 30 °C/час.

Выполнение работы осуществляется по единому алгоритму, включающему в себя изменение мощности реактора с помощью автоматического регулятора нейтронной мощности АР-1 или АР-2 путем воздействия на $N_{\text{зад}}$ 1АРМ или $N_{\text{зад}}$ 2АРМ (рис. 4).

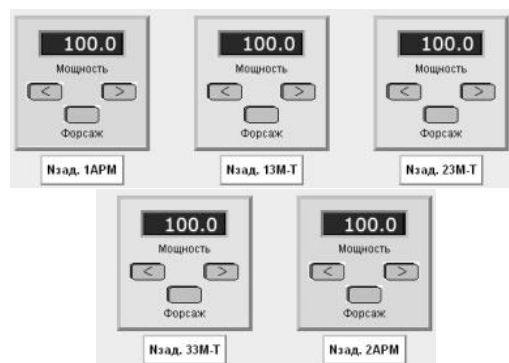


Рис. 4. Автоматические регуляторы нейтронной мощности АР-1 и АР-2

Изменение мощности реактора производится ступенями по 5% с заданной скоростью. При этом регулятору давления пара в ГПК задается уставка на поддержание давления острого пара в соответствии с указаниями инструкции.

В процессе изменения мощности реактора производится коррекция оборотов ГЦН-1 ГЦН-2 до требуемых значений. При изменении мощности реактора на 5 % $N_{ном}$ на формате АКНП делается выдержка для стабилизации теплотехнических параметров (температуры натрия на входе-выходе ПТО, парогенератора, острого пара и т. д.) и производится запись их значений с проверкой соответствия заданным на данном этапе.

На последнем этапе работы, при достижении 100 % $N_{ном}$, поочередным открытием задвижек подачи пара отбора от турбины производится подключение ПВД 1, 2 по пару для подъема температуры питательной воды после ПВД до номинального значения на панели управления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование программно-тренажерных средств повышает качество подготовки специалистов для атомной энергетики. Обучение на тренажерах помогает оператору освоить безошибочное выполнение алгоритмов управления, анализ информации, понимать хронологию событий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Tashlykov O., Shcheklein S., Sesekin A., Chentsov A., Nosov Y., Smyshlaeva O. Ecological features of fast reactor nuclear power plants (NPPs) at all stages of their life cycle. WIT Transactions on Ecology and the Environment. 2014. T. 190 VOLUME 2. P. 907-918.
2. Ташлыков О.Л., Щеклеин С.Е. Экологическое прогнозирование в ядерной энергетике XXI века // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. 2015. № 8-9 (172-173). С. 50-58.
3. Ташлыков О.Л., Щеклеин С.Е., Карпенко А.И., Бельтюков А.И., Тучков А.М. Опыт подготовки специалистов для инновационной ядерной энергетики // XIV Международная конференция «Безопасность АЭС и подготовка кадров»: тезисы докладов. Обнинск.: ИАТЭ НИЯУ МИФИ, 2015. С. 54-57.
4. Ташлыков О.Л., Щеклеин С.Е. Новые технологии подготовки специалистов для инновационного энергоблока АЭС с реактором БН-800 / Новые образовательные технологии в вузе: сб. материалов седьмой международной научно-методической конференции, 8–10 февраля 2010 года. В 2-х частях. Часть 2. Екатеринбург: ГОУ ВПО «УГТУ-УПИ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина», 2010. С. 401-406.
5. Щеклеин С.Е., Ташлыков О.Л., Велькин В.И., Шастин А.Г., Дементьев В.Н., Маркелов Н.И., Сорокин Ю.И. Опыт сотрудничества концерна «Росэнергоатом» и Уральского государственного технического университета в области подготовки специалистов для технического обслуживания и ремонта оборудования АЭС // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2004. №3. С. 121-129.
6. Ташлыков О.Л., Носов Д.А. Использование симуляторов «ТОМАС-1», «ТОМАС-2» для моделирования переходных режимов, вызванных нарушениями в ремонте оборудования АЭС / XI Международная конференция «Безопасность АЭС и подготовка кадров – 2009»: тезисы докладов, Обнинск, 29 сентября – 2 октября 2009 г. в 2-х т. Т. 2. – Обнинск: НОУ «ЦИПК», 2009. С. 67-68.
7. Ташлыков О.Л., Наумов А.А., Щеклеин С.Е. Моделирование процесса замораживания натрия в трубопроводах с целью оптимизации ремонта реакторных установок на быстрых нейтронах // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. 2013. № 2. С. 21-26.
8. Ташлыков О.Л., Щеклеин С.Е., Климова В.А., Наумов А.А. Моделирование виртуальных радиационных полей // Дистанционное и виртуальное обучение. 2011. №4. С. 24-34.
9. Русских И.М., Селезнев Е.Н., Ташлыков О.Л., Щеклеин С.Е. Экспериментально-теоретическое исследование органометаллических радиационно-защитных материалов, адаптированных к источникам излучения со сложным изотопным составом // Ядерная физика и инжиниринг. 2014. Том 5. №5. С. 449-455.
10. Ташлыков О.Л., Щеклеин С.Е., Лукьяненко В.Ю., Михайлова А.Ф., Русских И.М., Селезнев Е.Н., Козлов А.В. Оптимизация состава радиационной защиты // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. 2015. № 4. С. 36-42.
11. Балушкин Ф.А., Сесекин А.Н., Ташлыков О.Л., Чеблоков И.Б., Щеклеин С.Е., Ченцов А.Г. Использование метода динамического программирования для оптимизации демонтажа оборудования энергоблоков АЭС, выводимых из эксплуатации, с целью минимизации облучения // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2009. №4. С. 169-176.
12. Григорьев А.М., Иванко Е.Е., Ченцов А.Г., Сесекин А.Н., Ташлыков О.Л., Щеклеин С.Е. Решение задач маршрутной оптимизации применительно к радиационно опасным объектам с использованием суперкомпьютера «Уран» В книге: Безопасность АЭС и подготовка кадров 2011. С. 103-105.

УДК 621.039

О. Л. Ташлыков, С. Е. Щеклеин

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина,
г. Екатеринбург, Россия

Г. А. Новиков

ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, Москва

О ФОРМИРОВАНИИ КУЛЬТУРЫ БЕЗОПАСНОСТИ В ПРОЦЕССЕ ОБУЧЕНИЯ СТУДЕНТОВ В ВУЗЕ

Подчеркнута необходимость наличия культуры безопасности для реализации принципов безопасности атомных станций. Приведены определения, характеристики, основные составляющие культуры безопасности. Рассмотрены пути формирования основ культуры безопасности в университете, как важный этап перехода к ее развитию при работе выпускника на АЭС. Обобщен опыт формирования основ культуры безопасности в процессе подготовки специалистов для атомной энергетики (обучения студентов) на кафедре «Атомные станции и возобновляемые источники энергии» УрФУ.

Ключевые слова: атомная электростанция; принципы безопасности; культура безопасности; человеческий фактор; подготовка персонала; обучение в университете.

O. L. Tashlykov, S. E. Shcheklein

Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

G. A. Novikov

FGBU GNC FMBC named after A. I. Burnazyan of FMBA of Russia, Moscow

THE FORMATION OF SAFETY CULTURE DURING THE PERIOD OF STUDENTS TRAINING AT THE UNIVERSITY

The necessity of the safety culture presence for the realization of nuclear power plants' safety principles is underlined. The determinations, characteristics and main components of the safety culture are given. The ways of the safety culture basis formation at the university as a significant stage of the transition to its development during the specialist's work at a NPP are considered. The experience of the safety culture basis formation during the nuclear energy specialists (students) training at the department of "Nuclear energy and renewable energy sources" at UrFU is summarized.

Key words: nuclear power plant; safety principles; safety culture; human factor; personnel training; university education.

ВВЕДЕНИЕ

Существуют три фундаментальных принципа безопасности: принцип управления, принцип глубокого эшелонированной защиты и технические принципы. В свою очередь, к фундаментальным принципам управления относятся внедрение принципов культуры безопасности, ответственность эксплуатирующей организации, обеспечение нормативного регулирования и проверка всей деятельности, связанной с безопасностью. Без наличия культуры безопасности реализация основных принципов безопасности атомных станций невозможна. Культура безопасности имеет особенности, выделяющие ее из всех принципов безопасности.

В отчете INSAG-3 «Основные принципы безопасности атомных станций» (1988) культура безопасности представлена как фундаментальный принцип управления безопасной эксплуатацией АС. Для кон-

кретизации и иллюстрации этого понятия примерами в 1991 году вышел отчет INSAG-4 «Культура безопасности».

В последующем понятие «культура безопасности» было раскрыто в INSAG-15 «Основные вопросы повышения культуры безопасности» (2002) и в ряде других документов МАГАТЭ (например, «Культура безопасности на ядерных установках: Руководство по повышению культуры безопасности» IAEA-TECDOC-1329, МАГАТЭ, Вена, 2002).

Практической целью внедрения культуры безопасности на рабочих местах является то, что все лица и организации, причастные к ядерной энергетике, должны руководствоваться в своих действиях и взаимоотношениях установленной культурой безопасности.

Существует несколько определений понятия культуры безопасности. Как следует из этих определений, понятие «Культура безопасности» связывают с

позиций, образом мыслей и поведением отдельных лиц, а также со стилем деятельности организаций.

Культура безопасности представляет собой слияние таких понятий, как достоинство, уровень компетентности, этика и нормы допустимого поведения. Все они направлены на поддержание самодисциплины для укрепления безопасности вне юридических и регуляторных норм. Поэтому культура безопасности должна быть всегда в мыслях и проследиваться в действиях любого лица на любом иерархическом уровне и в любой организации.

Вопросам формирования культуры безопасности посвящено большое количество публикаций. Однако, так или иначе, все они связаны с формированием культуры безопасности уже у работников АЭС. Однако невозможно сразу запрограммировать человека на какую-либо установку. Для формирования того или иного мировоззрения (каким и является культура безопасности) требуется достаточно длительный период времени. И насколько раньше начнется формирование у молодого человека какого-либо мировоззрения, в данном случае культуры безопасности, настолько эффективней это будет происходить [1].

О РОЛИ ЗНАНИЙ И КОМПЕТЕНЦИЙ В КУЛЬТУРЕ БЕЗОПАСНОСТИ

Среди основных черт культуры безопасности (ответственность, приверженность, мотивация, надзор, контроль, личное осознание) важное место занимают *знания и компетентность (профессионализм)*, которые обеспечиваются через профессиональную подготовку персонала, его самоподготовку и общую культуру, впитываемую с детства. Культура безопасности не может быть реализована малокультурными в широком смысле этого слова людьми с неразвитым чувством ответственности.

Культура безопасности создается персоналом эксплуатирующих организаций непосредственно на рабочих местах на основе достижения высокого качества в трех главных сферах:

- *качество персонала* на основе общей культуры, воспитания, образования, профессионализма, идеологии и психологии безопасности, формирующих корпоративную культуру на основе организации труда;
- *качество оборудования*, включая его безопасность, стойкость, эксплуатационную надежность, эргономичность и эстетичность;
- *качество технологических процессов*, включая их безопасность и четкость технического оформления, оформления организационно-распорядительных документов и наглядной агитации.

Формирование культуры безопасности в производственном коллективе целенаправленно осуществляется с помощью следующих психолого-педагогических средств:

- информирование, передача новых знаний, внушение и научение безопасному поведению и правильному выполнению работы;

- принятие роли образца для подражания, специалиста, авторитетного в вопросах безопасности;
- заражение идеями, настроениями, поддерживающими инициативу в поиске средств, усиливающих безопасность;
- поддержка мотивации безопасной работы у подчиненных: поощрение инициативных работников и порицание равнодушных к вопросам личного участия в повышении безопасности на рабочих участках;
- внимательное отношение к проблемам подчиненных, способствующих снижению самоконтроля в работе;
- терпимое отношение к работнику, непроизвольно совершившему ошибку, оказание помощи в анализе причин неправильного действия.

Формирование культуры безопасности означает воспитание у каждого человека, имеющего отношение к атомной энергетике, такого состояния, при котором он окажется просто неспособным сделать какой-либо шаг в ущерб безопасности, даже если вероятность реализации опасности чрезвычайно мала. По определению профессора Стэнли Дитса – «Культура безопасности – это то, как мы работаем, когда за нами не наблюдают».

Среди осязаемых факторов механизма культуры безопасности необходимо выделить качество персонала и повышение его профессиональной подготовки, включающей вводное, периодическое, непрерывное обучение, непрерывную оценку, а также обеспечение качества обучения и подготовки обучающего персонала.

В эксплуатации учет человеческого фактора должен осуществляться путем систематического исследования человеческих ошибок с помощью анализа событий, аварий, предотвращенных событий (почти аварий), добровольных сообщений, а также путем поиска слабых мест в производственных предпосылках производительности.

В стандартных исследованиях причины возникновения нарушений в работе АС выводят из отказов оборудования, недостатков процедур и человеческого фактора. Однако такой подход не всегда позволяет точно выявить причины нарушений. Для более глубокого исследования специалистами АО «Концерн Росэнергоатом» предложен анализ по схеме: преднамеренные нарушения – неосознанные нарушения (рис. 1). Таким образом, нарушения по вине персонала можно рассматривать с точки зрения степени осознанности их действий [2].

Категории неправильных действий:

- случайная ошибка-промах – нечаянный пропуск или непреднамеренное выполнение ненужного действия;
- ошибка по незнанию – неправильное действие, связанное с недостатками профессиональной подготовки и тренировки;
- сознательно выполненное неправильное действие или мотивационная ошибка.

Интеллектуальный труд практически не поддается контролю, поэтому в организациях (вузе) воспитание культуры безопасности может базироваться на соответствующей мотивации поведения человека. Из ряда сформулированных психологами мотивов, определяющих профессиональное поведение человека, для формирования культуры безопасности в вузе можно использовать следующие: познавательный интерес к делу, уважение к собственной про-

фессии, осознание личной ответственности за результат своих действий. В целях профилактики неправильных действий персонала необходимо проводить заблаговременную оценку риска совершения неправильного действия, то есть профессиональной надежности. На основании результатов такой оценки проводятся разработка и выполнение мероприятий, предупреждающих неправильные действия персонала, или разработка и выполнение корректирующих мероприятий.

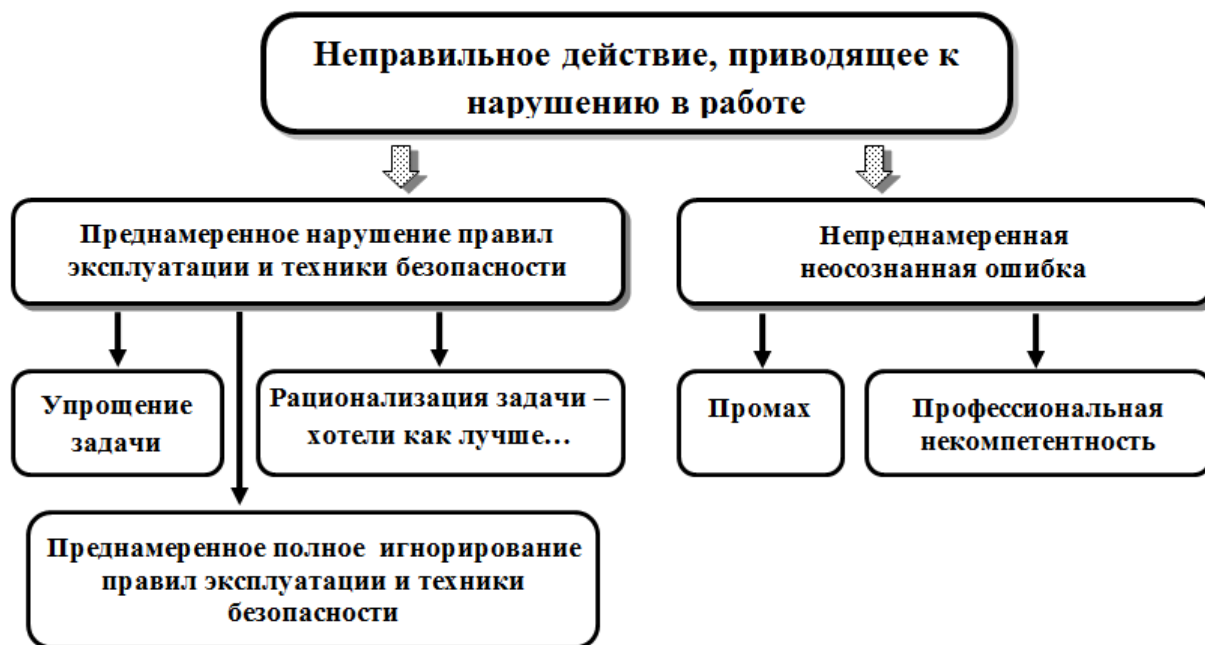


Рис. 1. Классификация нарушений в работе АС

Тренировки внимания, памяти и, в какой-то мере, устойчивости в стрессовых ситуациях, помогают человеку избежать промахов (случайных ошибок), повышают его устойчивость к нестандартным ситуациям.

Для преодоления незнания требуется совершенствование подготовки персонала в высших, средних специальных учебных заведениях, отраслевых учебно-тренировочных центрах. При этом основное внимание должно уделяться совершенствованию учебных программ, инструкций, регламентов, нормативной документации, поощрению роста профессиональной компетентности и обмену информацией по вопросам безопасности.

Своевременное напоминание персоналу о действительно имевших место событиях и о возможных последствиях нарушения порядка ведения предстоящей работы является эффективным способом формирования культуры безопасности. Как показывает опыт, наиболее эффективно включение сообщений о событиях в целевые инструктажи перед выполнением важных работ. При этом затраты по сравнению с достигаемым эффектом можно считать ничтожными.

Для полноценного использования «обучения на живых примерах» нужна большая организационная работа на станционном уровне и на уровне эксплуатирующей организации по сбору и анализу информации о нарушениях. Обмен информацией не только внутри отдельных стран, но и между эксплуатируемыми организациями различных стран о событиях на АЭС и о значительном опыте эксплуатации позволяет корректировать программы подготовки персонала. При этом в качестве приложения сразу готовится учебный материал для персонала. Этот учебный материал обладает особой ценностью, т. к. в его основе лежат реальные события, он тщательно проанализирован специалистами разных стран и содержит корректирующие меры, направленные на исключение повторения таких событий.

Важным фактором в формировании культуры безопасности является изучение опыта и анализ ошибок эксплуатации, технического обслуживания и ремонта, приведших к серьезным последствиям. Это связано с тем, что наибольший эффект в обучении дают реальные примеры из практики, с анализом ошибок и последствий, к которым они привели. Для использования в процессе обучения конкретных примеров ошибок персонала и их последствий на

кафедре «Атомные станции и возобновляемые источники энергии» начиная с 1999 г. формируется база данных об инцидентах и событиях [3]. Разбор таких событий позволяет студентам оценить правильность действий персонала, используя свои знания по технологическим схемам, оборудованию АЭС, процессам, протекающим в них. Помимо этого, формулируются конкретные предложения (переработка инструкций, обучение персонала, введение дополнительных средств контроля отдельных операций и т. д.) по исключению в дальнейшем повторений происшедших событий.

Профессионализм в работе человека проявляется в прочных знаниях и способности применять знания на практике. Профессионализм – это умение выстроить приоритеты в выборе главной цели, в построении плана работы и применении знаний, умений и навыков на каждом этапе работы.

Для культуры безопасности признаком высокого профессионализма является безопасное выполнение работ на должном качественном уровне при строгом соблюдении регламента, производственной дисциплины, требований техники безопасности.

Профессионал сумеет оценить потенциальную опасность проведения работ и сведет к минимуму риск совершить неправильные действия. Для этого работники должны не только обладать подходящей квалификацией и опытом в конкретных областях их специализации, но также стремиться и уметь исследовать потенциально небезопасную практику работ и выявлять недостатки, где бы и когда бы они ни столкнулись с ними, обращать внимание других лиц на замеченные недостатки.

Управление персоналом рассматривается как часть единой системы управления. При этом человек и организационная культура наиболее значимы для системы управления. В соответствии с положениями стандартов и рекомендаций МАГАТЭ предлагается следующий порядок работы с персоналом:

- привлечение и отбор сотрудников, пригодных по здоровью и психофизиологическим характеристикам для атомной отрасли;
- проведение начальных тренингов и обучения в соответствии с квалификационными программами;
- прохождение стажировки на рабочем месте, наставничество;
- поддержание и повышение квалификации;
- управление тренинговыми программами;
- планирование кадровых потребностей.

Подходы к реализации перечисленных элементов управления, а также методов работы с персоналом подробно описаны в документах МАГАТЭ.

Исходя из анализа ремонтных кампаний на АЭС АО «Концерн Росэнергоатом», можно выделить дефицит культуры безопасности для ремонтного персонала в следующих видах деятельности [1]:

- знание ремонтным персоналом условий работы на АЭС;
- понимание потенциальных последствий ошибок;

– соблюдение требований технической документации.

Поскольку кафедра «Атомная энергетика» на протяжении многих лет специализируется на подготовке специалистов для технического обслуживания и ремонта (ТОиР) систем и оборудования АЭС [4-6], кроме формирования составляющих культуры безопасности, связанных с приобретением научно-технических знаний, появилась возможность отработки практических навыков и умений. Для реализации этого можно использовать несколько направлений, вытекающих из вопросов, приводимых в приложении INSAG-4 для помощи в самопроверке по уровню культуры безопасности применительно к ТОиР. Среди этих тридцати с лишним вопросов при обучении студентов можно использовать следующие:

1. Обучен ли персонал знанию последствий для безопасности АС ошибочных действий?
2. Может ли подготавливаемый персонал привести примеры, когда производственные ошибки приводили к изменениям программы подготовки?
3. Используются ли при подготовке обслуживающего персонала к выполнению сложных операций макеты и видеозапись?
4. Может ли персонал сказать, каким образом будет нарушена безопасность в случае его ошибочных действий? В случае ошибочных действий других работников?
5. Строго ли соблюдаются инструкции даже в тех случаях, когда имеются более быстрые методы исполнения работ?
6. Какое внимание уделяет персонал полноте и аккуратности записей в исполнительной документации?
7. Останавливает ли персонал работу для обдумывания, сталкиваясь с непредвиденными ситуациями?

Для внедрения этих направлений в практику подготовки специалистов на кафедре «Атомная энергетика» учебно-тренировочный комплекс, созданный при поддержке департамента ТОиР Концерн «Росэнергоатом», был оснащен необходимым оборудованием, ремонтными приспособлениями, макетами, позволяющими выполнять лабораторные работы по техническому обслуживанию и ремонту арматуры различных видов, насосов, сварке оборудования и трубопроводов, контролю сварных соединений. При специальной подготовке студентов по направлению «Техническое обслуживание и ремонт» в 1980-90-е годы (в рамках специальности «Атомные электростанции и установки») в учебных курсах по ремонтной тематике предусматривалось углубленное изучение нормативной и исполнительной документации по ТОиР, технологических процессов ремонта, разработанных совместно со специалистами АЭС, АЭР.

Подготовка перед лабораторными работами по техническому обслуживанию и ремонту проводится с

использованием полномасштабных макетов или видеозаписей, освежающих знания обучающихся и иллюстрирующих возможные ошибки. В качестве примеров ТООР использовались технологические процессы ремонта арматуры и насосов представленные в виде мультимедиа и видеоматериалов по ремонтным операциям с комментариями.

Контроль работ может производиться как контролирующим лицом непосредственно в процессе выполнения работ, так и с помощью видеосъемки с последующим разбором и анализом выполнения работ. При этом может быть проанализирована одна из составляющих культуры безопасности для индивидуумов – «Строго регламентированный и осторожный подход», включающий в себя: правильное понимание инструкций, программ и других руководств по выполнению работы, точное следование руководствам (инструкциям), «не срезать углы» (т. е. строго следовать установленной последовательности операций, даже если кажется, что их число можно сократить) и т. д.

Ответ на вопрос «Обучен ли персонал знанию последствий для безопасности АС ошибочных действий?» требует комплексного подхода, поэтому представляет интерес оценка знаний обучающихся по технологическому процессу, схеме, конструкции оборудования и его роли в схеме АЭС и т. д. В качестве проверки студентам выдаются задания по анализу возможных последствий отказа конкретного оборудования, вышедшего из строя по причине, например, некачественного ТООР.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Культура безопасности – это важное наполнение человеческого фактора в безопасности. Человек может быть причиной опасных событий и богатым источником стабилизирующих действий и мер. Культура безопасности призвана устранять первое и обеспечивать второе.

Формирование культуры безопасности у специалистов для атомной энергетики необходимо начинать в процессе обучения в высших учебных заведениях.

Как показывает опыт подготовки специалистов для атомной энергетики на кафедре «Атомные станции и ВИЭ», внедрение в учебный процесс специально разработанных тем, вопросов, использование специфических приемов при выполнении лабораторных и практических работ позволяет формировать

базовые основы культуры безопасности у студентов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ташлыков О.Л., Щеклеин С.Е. О роли высшей школы в формировании культуры безопасности у молодых специалистов для атомной энергетики / Перспективные энергетические технологии. Экология, экономика, безопасность и подготовка кадров // Сборник научных трудов. – Екатеринбург, ООО ИД «Урал Юр Издат», 2006. С. 7-12.
2. Новиков Г.А., Ташлыков О.Л., Щеклеин С.Е. Безопасное использование ядерной энергии: правовые аспекты и методы управления, регулирования и обеспечения ядерной и радиационной безопасности: учебное пособие / Г.А. Новиков, О.Л. Ташлыков, С.Е. Щеклеин; под общ. ред. Г.А. Новикова. Екатеринбург: УрФУ, 2011. 510 с.
3. Атомные электростанции с реакторами на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем: учебное пособие. В 2 ч. Ч. 2 / А.И. Бельтюков, А.И. Карпенко, С.А. Полуяков, О.Л. Ташлыков, Г.П. Титов, А.М. Тучков, С.Е. Щеклеин; под общ. ред. С.Е.Щеклеина, О.Л. Ташлыкова. – Екатеринбург: УрФУ, 2013. – 420 с.
4. Щеклеин С.Е., Ташлыков О.Л., Велькин В.И., Шастин А.Г., Дементьев В.Н., Маркелов Н.И., Сорокин Ю.И. Опыт сотрудничества концерна «Росэнергоатом» и Уральского государственного технического университета в области подготовки специалистов для технического обслуживания и ремонта оборудования АЭС // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2004. №3. С. 121-129.
5. Ташлыков О.Л., Щеклеин С.Е., Шастин А.Г., Кадников А.А. Использование современных технологий подготовки персонала для технического обслуживания и ремонта тепломеханического оборудования АЭС / Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики // Сборник докладов шестой международной научно-технической конференции 21-23 мая 2008 г. – Москва, 2008. С. 332-335
6. Ташлыков О.Л., Щеклеин С.Е., Борисова Е.В. Использование 3D-технологий при подготовке специалистов для инновационного энергоблока Белоярской АЭС с реактором на быстрых нейтронах БН-800 // Дистанционное и виртуальное обучение. 2010. № 10. С. 28-37.

УДК 621.039

В. Ю. Лукьяненко, А. Ф. Михайлова, О. Л. Ташлыков

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина,
г. Екатеринбург, Россия

ОПЫТ ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ ДЛЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ ЧЕРЕЗ НАУКУ

Обоснована значимость участия студентов в научно-исследовательской работе при подготовке специалистов для атомной энергетики. Обобщен опыт работ по организации участия студентов кафедры «Атомные станции и возобновляемые источники» УрФУ в научно-исследовательских работах. Описана практика реализации принципа преемственности между студентами старших и младших курсов при проведении отдельных направлений научных исследований.

Ключевые слова: научно-исследовательская работа; атомная электростанция; аналитический тренажер; гомогенный радиационно-защитный материал; оптимизация радиационной защиты.

V. Y. Lukyanenko, A. F. Mikhailova, O. L. Tashlykov

Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

THE EXPERIENCE OF THE NUCLEAR ENERGY SPECIALISTS TRAINING THROUGH THE SCIENCE

The significance of the future nuclear energy specialist's participation in the scientific research work is shown. The experience of "Nuclear energy and renewable energy sources" department, UrFU, students' participation in the scientific research work is summarized. The practice of realization of the succession principle for the senior and junior students for the certain directions of the research work is described.

Key words: research work; nuclear power plant; analytical simulator; homogenous radiation protective material; radiation protection optimization.

ВВЕДЕНИЕ

Информационное общество ставит перед современными инженерными кадрами задачи такой сложности, что их решение требует не только необходимой суммы фундаментальных и специальных знаний, но и определенных навыков творческого мышления, постоянного повышения своей квалификации, быстрой адаптации к изменяющимся условиям. В особенности это касается задач в области использования атомной энергии. Эти качества молодых специалистов необходимо формировать в вузе. Воспитываются они через активное участие студентов в научно-исследовательской работе.

Научно-исследовательская работа студентов (НИРС) – это комплекс мероприятий учебного, научного, управленческого и организационно-методического характера, направленный на повышение уровня подготовки специалистов на основе привития студентам навыков научных исследований применительно к избранной специальности (направлению подготовки). Научно-исследовательская работа студентов организуется и проводится как в учебное, так и во внеучебное время.

Понятие научно-исследовательская работа студентов включает в себя следующие элементы:

– обучение студентов основам исследовательского труда, привитие им определенных навыков;

– выполнение научных исследований под руководством преподавателей.

В рамках научной работы студент сначала приобретает первые навыки исследовательской работы, затем начинает воплощать приобретённые теоретические знания в исследованиях, так или иначе связанных с практикой. «Овладение методом научного исследования – эта последняя цель научного образования – может быть достигнута только путем вовлечения учащегося в самостоятельную исследовательскую работу. Высшая научная школа должна быть поэтому, прежде всего, очагом научного исследования, преподаватель – активным исследователем, студент – участником научной работы, место занятий – аудитория, лаборатория – местом, где открываются новые научные истины. Высшая научная школа – место, где соединяются преподавание и исследование», – по утверждению С.И. Гессена.

ОПЫТ ОРГАНИЗАЦИИ НИРС

Ярким примером внедрения вышеперечисленных принципов подготовки молодых специалистов является работа, проводимая со студентами на кафедре «Атомные станции и возобновляемые источники энергии» (АСиВИЭ) УрФУ. За годы своей работы кафедрой подготовлено около 3000 специалистов для эксплуатации, проектирования, монтажа и ремонта АС.

Многие выпускники кафедры являлись и являются в настоящее время видными руководителями и организаторами производства, более 60 выпускников стали докторами и кандидатами наук, профессорами, руководителями научных и вузовских коллективов.

При подготовке молодых специалистов на кафедре используются научные и учебно-научные лаборатории, специализированные стенды и установки для научных и учебных работ. Сотрудниками кафедры опубликовано около двух тысяч научных статей, получено более 120 патентов на изобретения и полезные модели. Для работы в научной сфере на кафедре АСиВИЭ созданы уникальные возможности, сопоставимые с материальной базой лучших университетов России и дальнего зарубежья: аналитические тренажеры, экспериментальные стенды, компьютерные классы, исследовательские установки с новейшим оборудованием. Многообразие форм НИРС даёт возможность каждому студенту найти занятие по душе, и участие в ней необходимо для наиболее гармоничного и глубокого образования.

За прошедшие годы кафедра атомных станций и возобновляемых источников энергии УрФУ стала крупным центром подготовки кадров и проведения НИР и ОКР для предприятий отрасли. Она располагает собственным учебно-тренировочным комплексом по диагностике и ремонту оборудования АС различных типов (рис. 1), учебно-исследовательским полигоном, филиалом на Белоярской АЭС [1, 2].



Рис. 1. Учебно-тренировочный комплекс кафедры «АСиВИЭ»: стенд для моделирования режимов течения двухфазных потоков

Главным достоинством кафедры АСиВИЭ является ее профессорско-преподавательский состав, который внес значительный вклад в развитие выбранного ими направления научной деятельности. Сотрудники кафедры являются авторами монографий и учебных пособий по проблемам теплофизики, безопасности ядерных энергетических установок, технологиям диагностики и ремонта оборудования АС, радиационной безопасности, эксплуатации АС с реакторами на быстрых нейтронах.

Возможности кафедры и сотрудничество с организациями, предприятиями (АО «Институт реакторных материалов», Белоярская АЭС, АО «Атомэнергомонтаж», «Завод герметизирующих материалов»,

ВНИИАЭС, Уралэнергомонтаж и др.) позволяют студентам решать актуальные и практически важные задачи и проблемы, с которыми сталкивается атомная отрасль.

Постоянной практикой на кафедре является масштабное вовлечение студентов старших курсов в НИР и ОКР. Одним из направлений научно-исследовательских работ является оптимизация дозовых затрат персонала при проведении различных работ на радиационно-опасных объектах с использованием различных подходов и методик, таких как маршрутная оптимизация при работах в нестационарных радиационных полях, оптимизация состава гомогенных радиационно-защитных материалов и др.

Результаты научно-исследовательских работ, проводимых студентами кафедры, являются основой для выступления с докладами на научно-технических всероссийских и международных конференциях, публикаций в рецензируемых научных журналах, в том числе зарубежных изданиях [3 – 5].

Показателем эффективности обучения через решение реальных научно-технических задач являются традиционно занимаемые студентами кафедры призовые места в ежегодном конкурсе научных работ «Знания молодых ядерщиков – атомным станциям», проводимом ОАО «Концерн Росэнергоатом». Основная часть работ посвящена решению актуальных проблем Белоярской АЭС и имеет прикладное значение. Так, работы по утилизации низкопотенциальной сбросной теплоты в паротурбинном контуре БН-600, моделированию процессов замораживания натрия при проведении работ на системах, выполненные в последние годы, заняли первые места (рис. 2, 3). Многие из лауреатов этого конкурса работают сейчас на третьем и четвертом блоках Белоярской АЭС [6 – 8].



Рис. 2. Презентация Ковина Ивана, победителя конкурса научных работ «Знания молодых ядерщиков – атомным станциям» на итоговой конференции в Обнинске (2010)

Кафедра обладает уникальным опытом применения принципа преемственности (передачи накопленных знаний и навыков) между студентами старших и младших курсов. Особенно это важно при проведении исследований с использованием высокоточных расчетных кодов, требующих определенных практических навыков и знаний, формируемых не один год. В

качестве примера можно привести проводимые в настоящее время Михайловой Алиной и Лукьяненко Верой, студентками 6-го курса теоретические и практические занятия со студентами 3-4 курсов по направлению «Оптимизация радиационной защиты» (рис. 4). Мастер-классы, проводимые студентами старших курсов, имеют комплексное значение:

- вовлечение студентов младших курсов в научную деятельность на ранних сроках обучения, что позволяет им в более полной мере изучить выбранный предмет исследований, при участии преподавателей кафедры;
- повышение личностных компетенций студентов младших курсов за счет повышения их мотивированности, которая возрастает при обозрении успехов и достижений других студентов;
- появление возможности более длительной, глубокой и развернутой проработки различных исследований на кафедре, так как время не ограничивается периодом обучения;
- по окончании обучения между выпускниками сохраняется возможность передачи опыта и новых знаний, полученных на предприятиях атомной отрасли, при этом повышается осведомленность студентов о ситуации в отрасли и их профессиональный уровень.



Рис. 3. Грамота Анникова С. В.



Рис. 4. Занятия со студентами четвертого курса проводит студентка 6-го курса В. Лукьяненко

Сочетание кадрового потенциала кафедры, материальной базы, высокой мотивации обучающихся, а также особенности программ подготовки обеспечивают в будущем успех выпускников в выбранной профессии и убедительный профессиональный рост.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обеспечение высокой эффективности подготовки специалистов для атомной энергетики должно осуществляться по принципу «Обучение через науку», подразумевающему организацию образовательного процесса на базе решения реальных задач атомной энергетики. Этот процесс должен включать в себя изучение научно-технических проблем, разработку путей их решения, комплекс необходимых научно-исследовательских работ, создание опытного образца, в отдельных случаях – внедрение в производство.

Направление научно-исследовательской работы должно соответствовать профилю предприятия или организации, где студенты проходят производственную практику, начиная с третьего курса, и куда планируют распределиться для дальнейшей работы. Итогом является дипломное проектирование по разрабатываемой тематике.

Привлечение студентов к выполнению реальных научно-исследовательских работ экспериментального и аналитического характера, участие в реальных научных событиях и совместных разработках способствует ускорению адаптации выпускников в коллективах Белоярской АЭС, АО «ИРМ», других предприятий и организаций Росатома, создает базу для продолжения исследований и подготовки диссертационных работ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ташлыков О.Л., Щеклеин С.Е., Борисова Е.В. Использование 3D-технологий при подготовке специалистов для инновационного энергоблока Белоярской АЭС с реактором на быстрых нейтронах БН-800 // Дистанционное и виртуальное обучение. 2010. №10. С.28-37.
2. Ташлыков О.Л., Щеклеин С.Е., Карпенко А.И., Бельтюков А.И., Тучков А.М. Опыт подготовки специалистов для инновационной ядерной энергетики // XIV Международная конференция «Безопасность АЭС и подготовка кадров»: тезисы докладов. Обнинск: ИАТЭ НИЯУ МИФИ, 2015. С. 54-57.
3. Русских И.М., Селезнев Е.Н., Козлов А.В., Ташлыков О.Л., Щеклеин С.Е., Лукьяненко В.Ю., Михайлова А.Ф. Исследование гомогенных защит от нейтронного излучения // XIV Международная конференция «Безопасность АЭС и подготовка кадров»: тезисы докладов. Обнинск: ИАТЭ НИЯУ МИФИ, 2015. С. 263-266.
4. Ташлыков О.Л., Щеклеин С.Е., Лукьяненко В.Ю., Михайлова А.Ф., Русских И.М., Селезнев Е.Н., Козлов А.В. Оптимизация состава радиационной защиты // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. 2015. № 4. С. 36-42.
5. Tashlykov O.L., Shcheklein S.Ye., Lukyanenko V.Yu., Mikhaylova A.F., Russkikh I.M.,

Seleznev Ye.N., Kozlov A.V. The optimization of radiation protection composition // Nuclear Energy and Technology 2 (2016). PP. 42–44.

6. Ташлыков О.Л., Наумов А.А., Щеклеин С.Е. Моделирование процесса замораживания натрия в трубопроводах с целью оптимизации ремонта реакторных установок на быстрых нейтронах // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. 2013. № 2. С. 21–26.

7. Ташлыков О.Л., Ковин И.В., Кокорин В.В. Утилизация низкопотенциальной теплоты АЭС с реакто-

ром на быстрых нейтронах с использованием теплового насоса // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. 2012. № 3. С. 22–25.

8. Ташлыков О.Л., Толмачев Е.М., Семенов М.Ю., Сапожников Б.Г. Снижение тепловых нагрузок АЭС на окружающую среду путем использования тепловых насосов в схеме основного конденсатора паротурбинной установки // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. 2012. № 3. С. 16–21.

УДК 621.039

В. А. Климова, О. Л. Ташлыков, Та Ван Тхыонг, Ха Хюи Мань

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина,
г. Екатеринбург, Россия

ОСОБЕННОСТИ ПОДГОТОВКИ ИНОСТРАННЫХ СПЕЦИАЛИСТОВ ДЛЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ СТРАН-ПАРТНЕРОВ РОСАТОМА В УРФУ

Сформулированы основные задачи по подготовке специалистов для АЭС российского дизайна, сооружаемых за рубежом, в УрФУ. Проведен анализ начального периода обучения студентов Республики Вьетнам на кафедре «Атомные станции и ВИЭ», выявлены основные проблемы. Сформулированы предложения по совершенствованию процесса обучения.

Ключевые слова: подготовка специалистов; атомная электростанция; образование; иностранные студенты.

V.A. Klimova, O.L. Tashlykov, Ta Van Thyong, Ha Huy Manh

Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

THE PEQUILIARITIES OF FOREIGN SPECIALISTS EDUCATION AT URFU FOR THE NUCLEAR ENERGY OF ROSATOM PARTNER COUNTRIES

Defined are the main tasks of the specialists training at UrFU for the NPPs of Russian design that are constructed abroad. The analysis of initial period of Vietnam students' education at Nuclear Power Plants and RES department is made. Main problems are detected. The ways of educational process improvements are formulated.

Key words: specialists training; nuclear power plant; education; foreign students.

ВВЕДЕНИЕ

Россия занимает одно из ведущих мест в мире в области атомной энергетики. Госкорпорация «Росатом» – это единственная в мире полностью интегрированная компания атомной энергетики и промышленности. ГК «Росатом» занимает лидирующие позиции в ключевых сегментах атомной отрасли, в том числе в сооружении АЭС за рубежом.

Целями международной деятельности Госкорпорации «Росатом» являются:

- создание благоприятных международно-правовых и политических условий для глобальной экспансии и утверждения Госкорпорации в качестве лидера на мировом рынке ядерных технологий и услуг;
- укрепление режимов ядерной безопасности и нераспространения;

– продвижение интересов Госкорпорации в международных организациях и форумах. Обеспечение глобальной экспансии.

В международном сотрудничестве наблюдаются следующие тенденции развития:

- сегодня наибольшее внимание должно быть уделено развивающимся странам Азии, Африки Ближнего Востока и Латинской Америки, которые называют атомную энергетику в числе своих национальных экономических приоритетов;
- подписанные межправительственные и межведомственные соглашения создают условия для плодотворного сотрудничества при возведении новых объектов атомной энергетики российского дизайна за рубежом;
- взаимодействие с МАГАТЭ позволяет достичь общности подходов к тенденциям развития мировой

атомной энергетики и открывает перспективу двустороннего стратегического сотрудничества в этой области;

– осуществляется развитие института представителей Госкорпорации «Росатом» в иностранных государствах.

За последние пять лет заключены 44 двусторонних межправительственных соглашения в области мирного использования атомной энергии, подписаны 29 межведомственных соглашений, меморандумов, протоколов о сотрудничестве при сооружении объектов атомной энергетики за рубежом, открыты первые 14 представительств Госкорпорации «Росатом» при посольствах Российской Федерации и ее торговых представительствах за рубежом. Росатомом разработаны и выдвинуты инициативы по ядерной безопасности в мире.

В перспективный портфель заказов Росатома по строительству АЭС входит около 80 энергоблоков (рис. 1).

Для обеспечения глобализации ГК «Росатом» компетентным персоналом необходима эффективная подготовка кадров. Российская высшая школа имеет многолетний опыт подготовки высококвалифицированных специалистов для атомной отрасли.

В настоящее время для организации поддержки продвижения ядерных технологий Росатома в мире образован Консорциум ВУЗов, основные задачи которого представлены в таблице 1.

Основной целью популяризации российского ядерного образования в мире является поддержка продвижения российских ядерных технологий Росатома.

Ежегодно увеличивается число российских ведущих вузов, привлекаемых к сотрудничеству в рамках проектов Росатома, а также количество стран, в которых создаются программы международного межвузовского сотрудничества (рис. 2).

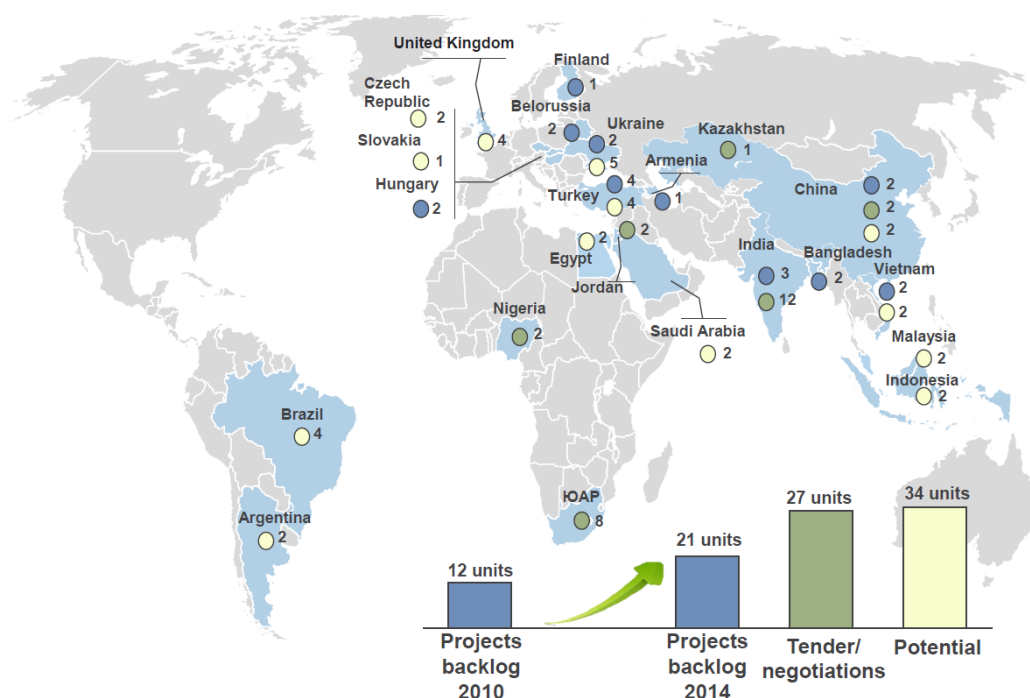


Рис. 1. Проекты Росатома по сооружению АЭС за рубежом



Рис. 2. Рост численности иностранных студентов в вузах РФ

Уральский федеральный университет является одним из ведущих вузов России по подготовке специалистов для атомной отрасли. Ядерные технологии, изучаемые в двух институтах УрФУ (Уральском энергетическом и Физико-технологическом), входят в число научных приоритетов университета.

Таблица 1

Задачи Консорциума вузов

Задачи	Результат
<ul style="list-style-type: none"> • популяризация российского ядерного образования в мире; • экспорт российского ядерного образования и образовательных программ: <ul style="list-style-type: none"> - набор и обучение иностранных студентов в вузах РФ; - перенос образовательного процесса в страну-партнер – создание совместных образовательных программ. 	<ul style="list-style-type: none"> • обеспечен ежегодный набор иностранных граждан на обучение в вузах РФ по атомным специальностям в соответствии с утвержденным заказом; • по российским образовательным программам обучается персонал страны-партнера.

Программы, связанные с ядерной энергетикой, в УралЭНИН реализует кафедра «Атомные станции и возобновляемые источники энергии», имеющая современный комплекс учебно-методических материалов и оснащения. Уникальный учебный комплекс тренажеров позволяет проводить практическую подготовку высококлассных специалистов, бакалавров и магистров в сфере эксплуатации атомных электростанций. Кафедра реализует различные программы дополнительного образования [1-4]. В последние годы в УрФУ разворачивается процесс обучения зарубежных студентов из стран-партнеров Росатома.

В настоящее время в связи с заинтересованностью Правительства Венгрии ведутся переговоры о подготовке специалистов для АЭС «Пакш» по направлениям:

- подготовка в УрФУ группы выпускников школ Венгерской республики в количестве 10-15 чел. по специальности «Атомные станции: проектирование, эксплуатация и инжиниринг»;
- профессиональная переподготовка специалистов с высшим техническим образованием по специальности «Атомные станции: проектирование, эксплуатация и инжиниринг»;
- разработка электронных образовательных ресурсов для системы дистанционного повышения квалификации работников атомной отрасли;
- выполнение совместных научно-исследовательских работ.

ПОДГОТОВКА СПЕЦИАЛИСТОВ ДЛЯ АЭС «НИНЬТХУАН-1» (ВЬЕТНАМ)

Хронология этого процесса может быть представлена следующими этапами:

1. Визит делегации УрФУ в ВУЗы Вьетнама (2012).
2. Международная выставка по атомной энергетике (вопросы подготовки специалистов из Вьетнама для строящейся АЭС "Ниньтхуан-1"), Ханой, 25-27 октября 2012 г.
3. Встречи, беседы со студентами ВУЗов Ханоя, школьниками, интервью телевидению Вьетнама, переговоры с представителями Министерства по атомной энергии Вьетнама по вопросам подготовки студентов из Вьетнама в УрФУ по специальностям «Атомные электростанции и установки», «Атомные станции: проектирование, эксплуатация, инжиниринг» (рис. 3, 4).
4. На основании межправительственного соглашения в 2014 г. обучение в УрФУ начала группа студентов из Вьетнама по специальности «Атомные станции: проектирование, эксплуатация и инжиниринг».



Рис. 3. Беседа со студентами Ханойского университета (Ханой, 2012 г.)

Вьетнамские студенты перед началом обучения по специальности в течение года изучали русский язык.

На первом курсе куратор группы (Климова В. А.) столкнулась с проблемами в языковой подготовке студентов. Вьетнамские студенты очень плохо понимали устную речь и с трудом объяснялись на русском языке. Например, когда студентам нужно было проходить медосмотр, куратор составила письменную инструкцию на трех страницах с приложением карты УрФУ, чтобы студенты смогли подготовить необходимые документы и добраться до поликлиники.

Преподаватели, обучающие этих студентов, также столкнулись с языковым барьером [5]. По наблюдениям Башкатова А. Н., преподавателя, ведущего курс физики в группе, студенты не успевают конспектировать лекции, читаемые в потоке. Поэтому на практических занятиях, проводимых отдельно для этой группы, приходилось повторять теоретический материал, данный на лекции, и, следовательно, сокращалось время на решение задач. Алексей Николаевич пользовался методикой обучения, при которой формулы пишутся на листе бумаги, а затем проецируются на экран с помощью эпидиаскопа. При этом он записывал не только формулы, но и текстовый комментарий.

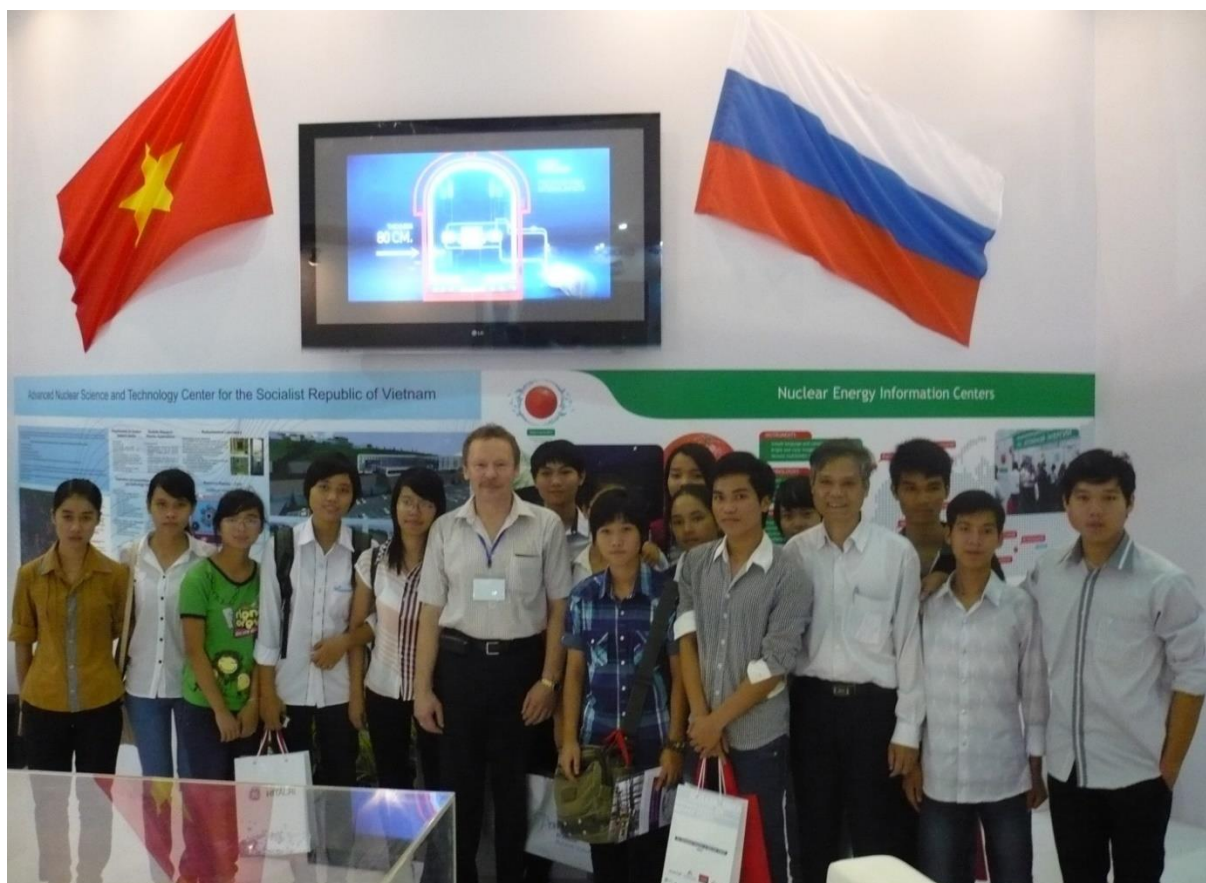


Рис. 4. Встреча с вьетнамскими студентами, желающими продолжить обучение в УрФУ по специальности «Атомные электростанции и установки» (Ханой, 2012 г.)

Преподаватель информатики Лашманова Н.А., которая вела у студентов лабораторные занятия, размещала теоретический материал и методические указания к лабораторным занятиям в системе электронных образовательных ресурсов Гиперметод (learn.urfu.ru). Общение со студентами (вопросы и их ответы) происходило в виде интернет-форума в этой системе. Нина Александровна также отмечала, что студенты плохо владеют устной речью.

На рис. 5 приведены результаты выполнения контрольных мероприятий по дисциплине «Информатика».

Контрольные мероприятия КР 1 и КР 2 выполнялись в аудитории, на основе изученного на лекции материала. При чтении лекции мультимедиа-технологии не использовались. Контрольные мероприятия КР 2 и КР 3 – это тесты, проведенные через систему Гиперметод (learn.urfu.ru). Теоретический материал в виде конспекта лекций также размещался в этой системе. Результаты даны в процентах от максимума баллов за контрольное мероприятие. Как следует из диаграммы, результаты контрольных мероприятий № 3 и № 4 для русской и вьетнамской групп практически совпадают. Те мероприятия, для выполнения которых требовалось воспринимать информацию на слух, показывают существенную разницу, связанную с недостаточностью языковой подготовки.

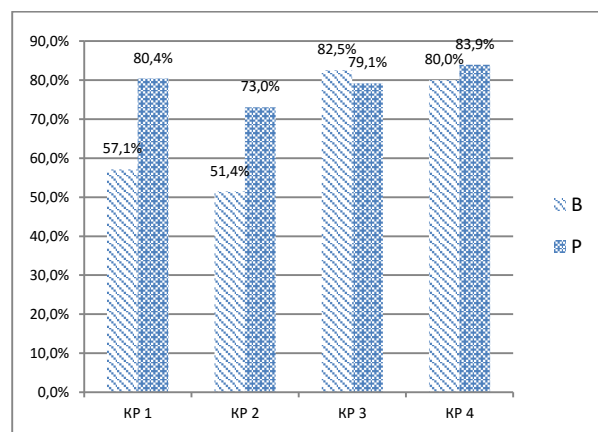


Рис. 5. Выполнение контрольных мероприятий вьетнамскими (В) и российскими (Р) студентами

На втором курсе началось изучение дисциплин, посвященных будущей специальности («Введение в специальность» и «Основы ядерной энергетики»). Эти дисциплины вызвали неподдельный интерес, т. к. вьетнамские студенты имеют глубокую мотивацию к получению специальности, позволяющей работать в высокотехнологичной отрасли. На первом этапе возникли те же трудности, связанные с восприятием устной русской речи, т. к. в первом полугодии были объединены для потоковых лекций русская и вьетнамская группы. Это не позволяло подобрать оптимальный темп лекций. После перехода на раздельное обучение эта проблема была решена. Для повышения эффективности обучения каждому

студенту были выданы лекции для опережающей подготовки к занятиям. В связи с заинтересованностью вьетнамских студентов курс «Основы ядерной энергетики» был продолжен на третьем курсе в виде факультативных занятий. По итогам обучения на втором курсе были отмечены успехи вьетнамских студентов (рис. 6).

На рис. 7 приведены данные по успеваемости вьетнамской группы за два курса обучения (за исключением гуманитарных курсов).



Рис. 6. Вьетнамские студенты

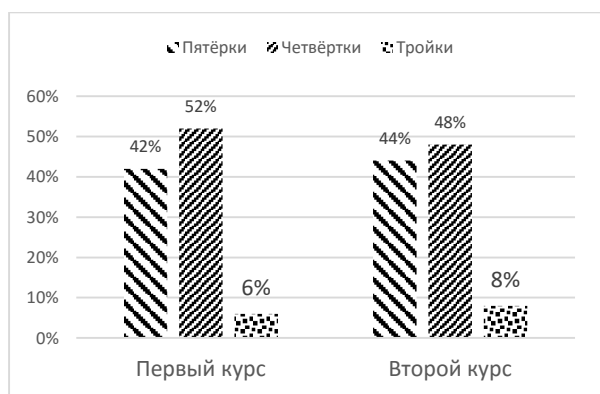


Рис. 7. Результаты обучения за первый и второй курсы

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обобщая итоги двух лет обучения вьетнамских студентов и проанализировав результаты проведенного анкетирования в конце первого и второго курсов, можно сделать вывод, что студенты адаптировались в вузе, лучше справляются с практическими заданиями, но по-прежнему имеют проблемы с устной речью. При обучении иностранных студентов, особенно на начальных курсах, нужно активно использовать мультимедиа-технологии и технологии дистанционного образования, так как студенты-иностранцы не успевают конспектировать со слов преподавателя и плохо понимают устную речь.

Кроме языкового барьера, существует проблема разной начальной подготовки российских студентов и иностранцев. Рабочие программы УрФУ по физике, химии, математике и прочим дисциплинам предполагают, что обучающийся прошел подготовку по этим дисциплинам в объеме российской общеобразовательной школы. Уровень школьной подготовки за рубежом может отличаться от принятого в России. Например, по данным преподавателя математики Маринова А.В. материал, изучаемый в первом семестре, был уже хорошо знаком вьетнамским студентам, поэтому у них не возникало трудностей с обучением. С другой стороны, преподаватель физики считает, что по сравнению с российскими школами уровень подготовки вьетнамцев ниже.

Преподавателями кафедры «Атомные станции и ВИЭ» разрабатывается план мероприятий, которые позволят повысить эффективность процесса обучения иностранных студентов, особенно в части хорошего уровня овладения русским языком.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Щеклеин С.Е., Ташлыков О.Л., Велькин В.И., Шастин А.Г., Дементьев В.Н., Маркелов Н.И., Сорокин Ю.И. Опыт сотрудничества концерна «Росэнергоатом» и Уральского государственного технического университета в области подготовки специалистов для технического обслуживания и ремонта оборудования АЭС // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2004. – №3. – С.121-129.
2. Ташлыков О.Л., Щеклеин С.Е. Виртуальные технологии обучения в решении проблемы снижения облучаемости ремонтного персонала // Дистанционное и виртуальное обучение. 2010. №8. С. 48-57.
3. Ташлыков О.Л., Щеклеин С.Е., Титов Г.П., Носов Д.А., Тучков А.М. Методика использования программно-тренажерных средств при изучении специальных дисциплин // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. 2016. №3. С. 63-72.
4. Ташлыков О.Л., Щеклеин С.Е., Карпенко А.И., Бельтюков А.И., Тучков А.М. Опыт подготовки специалистов для инновационной ядерной энергетики // XIV Международная конференция «Безопасность АЭС и подготовка кадров»: тезисы докладов. Обнинск: ИАТЭ НИЯУ МИФИ, 2015. С. 54-57.
5. Ташлыков О.Л., Климова В.А., Та Ван Тхыонг О проблемах подготовки иностранных специалистов для атомной энергетики стран-партнеров Росатома в УрФУ / Новые образовательные технологии в ВУЗе // Сборник статей XII международной научно-методической конференции НОТВ-2015 (Екатеринбург, 27-30 апреля 2015 г.) Научное электронное текстовое издание С. 189-195 <http://study.urfu.ru/Aid/Publication/13377/1/%D1%81%D0%B1%D0%BE%D1%80%D0%BD%D0%B8%D0%BA%202015.pdf>

УДК 621.039

К. В. Лим, А. А. Синяков

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина,
г. Екатеринбург, Россия

СТУДЕНЧЕСКИЕ ОТРЯДЫ ГК «РОСАТОМ»

Важнейшим принципом обеспечения безопасности в атомной энергетике является наличие «культуры безопасности» у всех работников. Формирование культуры безопасности происходит в течение длительного времени, поэтому важным фактором является вовлечение студентов в работы по сооружению АЭС. Помимо производственных практик в последние годы получило широкое распространение участия студенческих отрядов под эгидой Госкорпорации «Росатом» при строительстве АЭС. В докладе освещен опыт участия студентов кафедры «Атомные станции и ВИЭ» УрФУ в студенческих строительных отрядах Госкорпорации «Росатом» на объектах атомной энергетики.

Ключевые слова: атомная станция, Росатом, культура безопасности, производственная практика, студенческий отряд.

K. V. Lim, A. A. Sinyakov

Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

STUDENT TEAMS OF ROSATOM

The most important principle of security in the nuclear industry is the presence of a "safety culture" among all the employees. It takes a long time to form the safety culture, that's why an important factor is the involvement of students in the work on the construction of nuclear power plants. In addition to the production practices the participation of student teams under the auspices of the State Corporation "Rosatom" in the construction of nuclear power plants became widespread in recent years. The report highlights the experience of the students of "Nuclear power plants and renewable energy sources" department, UrFU in student construction brigades of the State Corporation "Rosatom" at nuclear facilities.

Key words: nuclear power plant, Rosatom, safety culture, production practices, student team.

ВВЕДЕНИЕ

Понятие «культура безопасности» впервые появилось в 1986 году в процессе анализа причин и последствий Чернобыльской аварии, проведенного Международным агентством по атомной энергии (МАГАТЭ). Было признано, что именно ее отсутствие явилось одной из причин трагедии.

Опыт эксплуатации атомных станций показывает, что причины возникновения аварий и инцидентов так или иначе связаны с поведением людей (человеческим фактором), а именно – с их отношением к проблемам безопасности. Особое внимание должно уделяться формированию личной ответственности и приверженности безопасности всех, чья деятельность влияет на безопасность АЭС. Студенческий отряд позволяет уже во время обучения в университете увидеть атомную станцию изнутри, познакомиться с её руководством и сотрудниками, оценить масштаб объектов атомной отрасли и развить ответственное отношение к своей будущей деятельности.

СТУДЕНЧЕСКИЕ ОТРЯДЫ ГК «РОСАТОМ»

21 ноября 2014 года было подписано соглашение о стратегическом партнерстве между Государственной корпорацией по атомной энергии «Росатом» и Молодежной общероссийской общественной организацией «Российские Студенческие Отряды». Документом

предусмотрено информационно-аналитическое и организационное взаимодействие, в частности, привлечение студентов профильных образовательных организаций к работе на объектах Госкорпорации «Росатом» в составе студенческих отрядов.

Для того чтобы работа стала более эффективной и системной, создан Штаб студенческих строительных отрядов атомной отрасли, а также сформирован Координационный совет по развитию студенческих отрядов атомной отрасли, в состав которого были включены представители опорных вузов атомной отрасли. Кураторами данного проекта со стороны Росатома стали директор по капитальным вложениям Госкорпорации «Росатом», директор ОЦКС Росатома Геннадий Сахаров и директор по персоналу Госкорпорации «Росатом» Татьяна Терентьева.

В 2014 году Координационным советом была проведена работа по систематизации формирования и организации труда студенческих отрядов: разработан и утвержден Единый отраслевой порядок привлечения студенческих отрядов в отрасль, разработаны Единые методические рекомендации по определению условий оплаты труда, обеспечению медицинского страхования, компенсации проезда и проживания бойцов студенческих отрядов, привлекаемых к участию в строительстве объектов атомной отрасли, проведен конкурс

на фирменный стиль студенческих строительных отрядов атомной отрасли.

«Для многих поколений советской и российской молодежи студенческие отряды стали настоящей «школой жизни», помогли приобрести необходимый трудовой опыт реализовать свои способности, приобрести навыки лидерства, научиться товариществу и взаимовыручке. Из года в год растет число бойцов студенческих отрядов, участвующих в строительстве атомных станций. В 2014 году более 700 ребят достойно показали себя на возведении Белорусской, Нововоронежской, Ростовской и Ленинградской АЭС. Мы уверены, что в летний трудовой семестр 2015 года бойцов студенческих отрядов на атомных стройках будет еще больше».

Генеральный директор
Госкорпорации «Росатом»
С.В. Кириенко [1].

27 ноября 2015 года в Отраслевом центре капитального строительства (ОЦКС) Росатома в г. Москва прошел первый Слёт студенческих строительных отрядов атомной отрасли. Участие в нем приняли 70 лучших бойцов, командиров и комиссаров студенческих отрядов из 14 субъектов Российской Федерации, среди которых была студентка нашей кафедры Ксения Лим.

Директор по капитальным вложениям ГК «Росатом», директор ОЦКС Росатома Геннадий Сахаров зачитал участникам слёта приветствие от генерального директора Госкорпорации «Росатом» Сергея Кириенко. В нем, в частности, было отмечено, какая масштабная работа ведется по систематизации и организации труда студенческих отрядов в стройкомплексе атомной отрасли. «Всего восемь лет назад на сооружении энергоблока № 2 Ростовской АЭС начал работу первый студенческий отряд из 20 человек. Сегодня вас уже более тысячи двухсот. Это огромное удовольствие – видеть, как растет и крепнет молодежное движение», – было подчеркнуто в приветствии.

«Масштабные планы по капитальному строительству в атомной отрасли выполняются при вашем непосредственном участии. Я выражаю вам благодарность не только от Росатома, но и от государства. Уверен, что вам покорятся еще множество производственных и творческих высот», – сказал Геннадий Сахаров.

Татьяна Терентьева, директор по персоналу Госкорпорации «Росатом»: «Ваша энергия чувствуется даже за километры и с вами хочется общаться все больше и больше. Совершенно очевидно, что вы можете работать сплоченно, и мы очень рады будем видеть вас на наших предприятиях».

Лучшим командирам строительных отрядов и представителям работодателей были впервые вручены почетные отраслевые награды: 10 знаков отличия «За вклад в развитие студенческих отрядов атомной отрасли». Ксения Лим была удостоена благодарности генерального директора Госкорпорации «Росатом» за высокий уровень производительности труда и качественное выполнение заданий.

Во всероссийское движение студенческих стройотрядов вовлечены сотни тысяч человек по всей стране, а в атомной отрасли студенческие стройки преодолели границы России и стали международными. В общей сложности в 2015 году в студенческих строительных отрядах атомной отрасли работало 1627 человек. Помимо Всероссийской студенческой стройки на объектах ФГУП «ПО «Маяк» на российских объектах (Курская АЭС, Нововоронежская АЭС-2, Ростовская АЭС, ВНИИТФ им. Забабахина, Сибирский химкомбинат, Ленинградская АЭС, Курская АЭС-2 и Балтийская АЭС) работали 642 бойца. Одновременно с ними на строительстве Белорусской АЭС работали еще 454 студента. Впервые в этом году был проведен открытый всероссийский конкурс на право участия стройотрядов в строительстве блоков за рубежом – в Индии, на АЭС «Куданкулам» (туда отправились двое бойцов) и на Тяньваньской АЭС в Китае (туда поехали восемь человек). Главный специалист отдела по развитию компетенций ОЦКС Росатома Геннадий Громяцкий в отчетном докладе отметил, что в 2015 году основной контингент бойцов стройотрядов составили ребята из опорных вузов атомпрома, в числе которых 47 учебных заведений [2].

ПРОФИЛЬНЫЙ СТУДЕНЧЕСКИЙ ОТРЯД «АТОМ». ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ

Первый профильный студенческий отряд атомного направления (далее ПСО «Атом») в Уральском федеральном университете был создан 6 апреля 2014 года. В 70°–90° годы на базе нашей кафедры «Атомная энергетика» (ныне «АСиВИЭ») существовал студенческий строительный отряд «Уран».



Рис. 1. Командир ПСО «Атом» Ксения Лим на Нововоронежской АЭС-2

К сожалению, в 1994 году ССО «Уран» распался. Спустя 20 лет первокурсники специальности «Атомные станции: проектирование, эксплуатация и инжиниринг» кафедры «Атомные станции и ВИЭ» решили восстановить традиции и создали новый студенческий отряд, теперь уже профильный, со звучным названием «Атом».



Рис. 2. Бойцы профильного СО «Атом» на строительстве Нововоронежской АЭС-2

В 2014 году ПСО «Атом» представлял УрФУ и Свердловскую область на Всероссийской студенческой стройке «Мирный Атом» в г. Нововоронеж. Ребята трудились на строительстве Нововоронежской АЭС-2. Каждый член отряда был награжден грамотой ОАО «Атомэнергопроект» за активное участие в сооружении 1-го энергоблока Нововоронежской АЭС-2 в пусковой период июль-август 2014 г.

Один из бойцов отряда, Анатолий Синяков, прошёл конкурс и принял участие в строительстве Тяньваньской АЭС в Китае. К кандидатам были предъявлены жесткие требования. Боец должен был иметь профиль-

ную для атомной отрасли специальность, владеть английским языком на уровне Intermediate, отработать как минимум 2 года в студенческих отрядах.

В Москве в представительстве ООО «Атомстройэкспорт» бойцам после трудоустройства были проведены многочисленные инструктажи по технике безопасности на стройке, а также ознакомление с правилами поведения в незнакомой и экзотичной стране. Руководители группы компаний ASE рады видеть в своих рядах молодых специалистов, особенно, если ребята прошли школу студенческих отрядов.



Рис. 3. Памятник ядерному реактору в натуральную величину (г. Волгодонск)

Трудовой семестр 2015 года прошёл там же, бойцы были трудоустроены в ПАО «Энергоспецмонтаж» и АО «НИКИМТ-Атомстрой».

В 2016 году студенты выезжали на Межрегиональную студенческую стройку «РосАтом». Ребята работали на сооружении 4 энергоблока Ростовской АЭС в ОАО «А Плюс Девелопмент».



Рис. 4. Международный студенческий строительный отряд «Патриот» на строительстве Тяньваньской АЭС в Китае



Рис. 5. Знамя Лучшего студенческого отряда МСС «РосАтом-2016»

В этом году профильный студенческий отряд «Атом» был удостоен звания Лучшего студенческого отряда МСС «РосАтом-2016», что позволит ему вне конкурса в 2017 году отправиться на самую крупную студенческую стройку Росатома – ПО «Маяк» (г. Озёрск, Челябинская область).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Росатом. [Электронный ресурс]. URL: <http://rosatom.ru/> (дата обращения 1.10.16 г.)
2. ОЦКС Росатома. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.ocks-rosatoma.ru/> (дата обращения 1.10.16 г.)

Секция 2

Атомная энергетика – экология, экономика и безопасность



УДК 621.039

Д. Е. Шумков, В. А. Климова, О. Л. Ташлыков

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина,
г. Екатеринбург, Россия

ЗАДАЧА ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ РАСХОЛАЖИВАНИЯ ШАХТЫ-ХРАНИЛИЩА ОТРАБОТАВШИХ ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИХ СБОРОК

Обоснована необходимость повышения надежности отвода остаточных тепловыделений от облученных тепловыделяющих сборок (ОТВС) в бассейнах выдержки и шахтах-хранилищах. Приведены примеры научно-исследовательских работ, выполненных на кафедре «Атомные станции и ВИЭ», с использованием систем автоматизированного моделирования. В работе представлены цели и задачи работы по повышению надежности охлаждения шахты-хранилища отработавших тепловыделяющих сборок. Приведены описание теплообменника охлаждения шахты-хранилища, результаты эксперимента по определению его характеристик. Выполнена постановка задачи компьютерного моделирования теплообменника для анализа его теплогидравлических характеристик.

Ключевые слова: ядерная установка, тепловыделяющие сборки; бассейн выдержки (шахта-хранилище); теплообменник; хранение отработавших ТВС; компьютерное моделирование.

D. E. Shumkov, V. A. Klimova, O. L. Tashlykov

Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

THE PROBLEM OF THE RELIABILITY INCREASING OF THE SPENT FUEL ASSEMBLIES STORAGE PIT

The necessity of the reliability increasing of the residual heat removing from the spent fuel assemblies in the cooling ponds and storage pits is grounded. The examples of the scientific research works of Nuclear Power Plants and Renewable Energy Sources Department with the use of computer simulation systems are given. The aims and tasks of the spent fuel assemblies' storage pit cooling reliability increase are presented. The description of a storage pit cooling heat exchanger is given. The results of the experimental determination of its characteristics are given. The problem of computer simulation of the heat exchanger is stated to analyze its thermal and hydraulic characteristics.

Key words: nuclear facility; fuel assemblies; cooling pond (storage pit); heat exchanger; spent fuel assemblies storage, computer simulation.

ВВЕДЕНИЕ

Ядерная безопасность установок определяется сохранением герметичности оболочек тепловыделяющих элементов как при работе реактора, так и при хранении облученных ТВС (ОТВС) в бассейне выдержки или шахте-хранилище. Для этого должно быть обеспечено надежное охлаждение ОТВС. После аварии на Фукусиме во всех странах, эксплуатирующих ядерные установки, были разработаны дополнительные мероприятия для предотвращения разгерметизации ОТВС в бассейнах выдержки. В связи с этим, была поставлена задача повышения надежности охлаждения шахты-хранилища АО «Институт реакторных материалов» при хранении ОТВС, а также выгрузке всей активной зоны с использованием специального теплообменника. В рамках решения данной задачи были проведены экспериментальные исследования работы теплообменника в производственных условиях АО «ИРМ». Для разработки мер по обеспечению надежного теплоотвода планируется провести моделирование теплогидравлических процессов с помощью стандартных программ, разработать пути повышения эффективности теплосъема остаточных тепловыделений.

Системы автоматизированного моделирования активно используются на кафедре «Атомные станции и ВИЭ» при выполнении научно-исследовательских работ различной тематики, например, [1–3].

Целями представленной работы являются:

- проверка работоспособности теплообменника;
- повышение коэффициента теплоотдачи и теплопередачи.

ОПИСАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ТЕПЛООБМЕННИКА И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Теплообменник предназначен для охлаждения воды шахты-хранилища и передачи тепла технической воде, поступающей из системы технического водоснабжения исследовательской ядерной установки ИВВ-2М. Схема движения теплоносителя – противоток.

Теплообменник змеевикового типа, горизонтального исполнения, диаметр гига составляет 240 мм. Вода I контура (химобессоленная) одновременно движется внутри трех трубок змеевикового типа. Охлаждающая (техническая) вода II контура движется в межтрубном пространстве.

Подача воды в теплообменник и отвод его из теплообменника производятся через патрубки диаметром 32 мм. Патрубки входа и выхода охлаждающей воды диаметром 50 мм вварены в корпус теплообменника (рис. 1).

В период с 03.08.2016 (начало 7:57) по 08.08.2016 (окончание 21:14) в АО «Институт реакторных материалов» были проведены исследования режимов работы смонтированного теплообменника шахты-хранилища ОТВС, расположенной на отметке 8.05. Результаты изменения температуры нижней отметки шахты-хранилища приведены на рис. 2. Среднее значение расхода теплоносителя I контура (химобессоленная вода, трубное пространство) составил $G_1 = 1,13$ кг/с ($V_1 = 4,06$ м³/ч), теплоносителя II контура (техническая вода, межтрубное пространство) – $G_2 = 3,77$ кг/с ($V_2 = 13,56$ м³/ч).

РАСЧЕТ ТЕПЛООБМЕННИКА ПРИ ЛЕТНИХ УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Конструктивные расчеты теплообменника проведены с целью определения поверхности теплообмена при частичной загрузке шахты-хранилища.

Температура воды I контура на входе в теплообменник (48 °С) принята по условиям эксплуатации шахты-хранилища. Температура охлаждающей воды на входе (25 °С) принята для летних условий эксплуатации. Температура охлаждающей воды на выходе не может быть больше 40 °С.

Среднее давление воды I контура составляет $p_1 = 2,4$ кг/см², среднее давление воды II контура – $p_2 = 5,34$ кг/см².

Для расчета принято: типоразмер змеевиковых труб Ø28 x 4 мм, внутренний диаметр кожуха 297 мм.

В таблице 1 приведены результаты расчета. Применялись стандартные методики расчета теплообменного оборудования, приведенные в [4 – 7].

Так как теплообменник предназначен для отведения тепла при аварийной или запланированной выгрузке ОТВС, то невозможно сделать достоверный практический расчет до периода плановой выгрузки ОТВС (октябрь 2017 года). Также для точного расчета необходимо учитывать систему вентиляции и остаточное энерговыделение ОТВС.

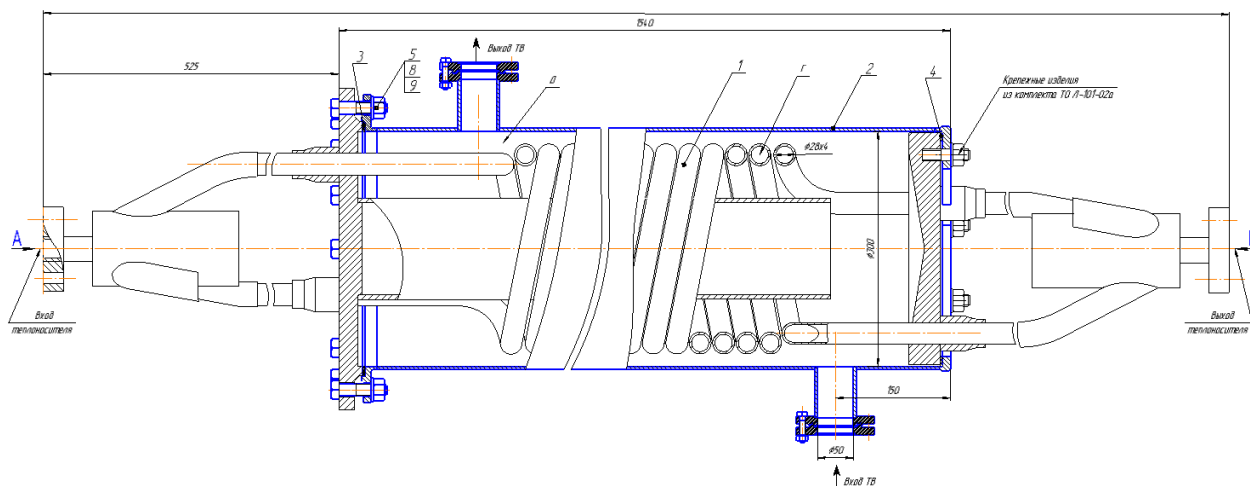


Рис. 1. Конструкция теплообменника



Рис. 2. Изменение температуры нижней отметки шахты-хранилища

Таблица 1

Результаты расчета теплообменника

Параметр	Значение
Температура теплоносителя I контура на выходе	31,3 °C
Температура охлаждающей воды на выходе	30 °C
Коэффициент теплоотдачи от теплоносителя I контура к стенке трубы	6327,1 Вт/(м ² ·K)
Коэффициент теплоотдачи от стенки трубы к теплоносителю II контура	1177,8 Вт/(м ² ·K)
Температурный напор	16,4 °C
Линейный коэффициент теплопередачи	23,8 Вт/(м·K)
Линейная плотность теплового потока	1226,2 Вт/м
Коэффициент теплопередачи	2970,6 Вт/(м ² ·K)
Фактическая мощность теплообменника	114 кВт

РАЗРАБОТКА КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ

В настоящий момент авторами разрабатывается компьютерная модель теплообменника, которая позволит анализировать его теплогидравлические характеристики при разных параметрах среды, а также вносить изменения в конструкцию теплообменника и исследовать их эффективность. Для создания модели выбрана среда автоматизированного проектирования Solid-Works и ее приложение для анализа аэрогидродинамики и теплообмена Flow Simulation.

Для достижения целей моделирования нужно решить ряд задач:

- 1) создать твердотельную модель теплообменника;
- 2) определить параметры компьютерного моделирования в Flow Simulation и провести верификационный расчет;
- 3) исследовать расчетную сетку на предмет достаточной точности;
- 4) провести ряд численных экспериментов и проанализировать результаты.

Твердотельная модель состоит из корпуса, трубок змеевика и трубных досок. Так как в задачу исследования входит только теплогидравлический расчет, модель строится с упрощениями. Например, крепежные болты и другие аналогичные элементы не учитываются. Также пренебрегаем переходным элементом от спирали к стакану, который имеет небольшое отклонение от диаметрагиба спирали. На рис. 3 показана деталь модели – змеевик.

С другой стороны, особенности комплекса Flow Simulation предъявляют некоторые требования к модели. Например, входные отверстия патрубков нужно закрывать крышками, на которых затем будут задаваться граничные условия для расчета.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На данной стадии исследования создана твердотельная модель теплообменника. Проводится подготовка

данных для создания проекта расчета теплогидравлических характеристик, в числе которых:

- физические особенности поставленной задачи (необходимость учета теплопередачи через твердую стенку, нестационарность, наличие ламинарно-турбулентного перехода и т.д.);
- теплофизические свойства материалов модели;
- граничные условия, в которые помимо геометрии модели входят характеристики рабочих сред на входе и на выходе из теплообменника;
- начальные условия, правильное задание которых позволит сократить время расчета.

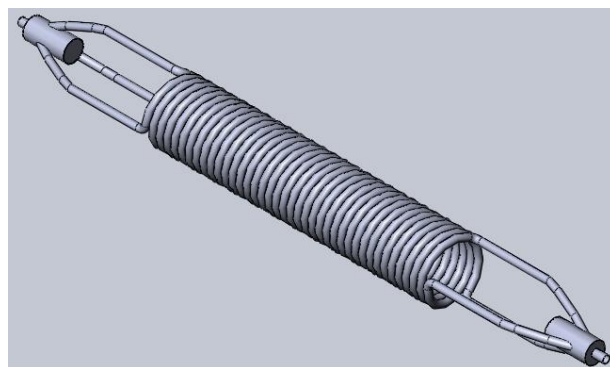


Рис. 3. Змеевик

Следующая стадия работы – верификация модели, в ходе которой результаты моделирования будут сравниваться с экспериментальными данными АО «ИРМ».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ташлыков О.Л., Наумов А.А., Щеклеин С.Е. Моделирование процесса замораживания натрия в трубопроводах с целью оптимизации ремонта реакторных установок на быстрых нейтронах // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. 2013. № 2. С. 21-26.
2. Ташлыков О.Л., Щеклеин С.Е., Климова В.А., Наумов А.А. Моделирование виртуальных радиационных полей // Дистанционное и виртуальное обучение. 2011. №4. С. 24-34.
3. Ташлыков О.Л., Климова В.А., Абрамов С.О. Возможности гидродинамического моделирования в решении проблемы эрозионно-коррозионного износа систем АЭС / Энергия и человек: сборник трудов Международной молодежной научной школы, Томск, 28-29 октября 2011 г.; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. С.3-6.
4. Уонг Х. Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров./Справочник. – М.: Атомиздат, 1979. – 216 с.
5. Киселев П.Г. Справочник по гидравлическим расчетам. М.: Государственное энергетическое издательство, 1972. – 312 с.
6. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям М., Машиностроение, 1992. – 672 с.
7. Ривкин С.Л., Александров А.А. Теплофизические свойства воды и водяного пара. – М., Энергия, 1980. – 160 с.

УДК 621.039

*О. Л. Ташлыков, А. Н. Сесекин, Ю. Ф. Долгий*Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина,
г. Екатеринбург, Россия*Г. Ю. Дубовой*

Белоярская АЭС, г. Заречный Свердловской обл., Россия

К ВОПРОСУ О ВОЗМОЖНОСТИ ОПТИМИЗАЦИИ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ ПО ПЕРЕГРУЗКЕ ТОПЛИВНЫХ СБОРОК РЕАКТОРОВ НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ

Рассмотрены особенности перегрузки реакторов на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем. Описаны основное транспортно-технологическое оборудование и операции с топливными сборками при перегрузке реакторов типа БН-600 и БН-800. Сформулированы задачи оптимизации при перегрузке. Представлена математическая модель перегрузочного устройства, описываемая с помощью уравнений Лагранжа второго рода.

Ключевые слова: реактор на быстрых нейтронах; тепловыделяющая сборка; перегрузка ядерного топлива; модель перегрузочного устройства.

O. L. Tashlykov, A. N. Seseikin, Yu. F. Dolgii

Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

G. Yu. Dubovoi

Beloyarskaya NPP, Zarechny, Sverdlovsk reg., Russia

ON THE POSSIBILITY OF OPTIMIZATION OF TRANSPORT-TECHNOLOGICAL OPERATIONS ON FAST BREEDER REACTORS REFUELING

The features of a fast neutron reactor with sodium coolant refueling are depicted. The basic transport-processing equipment and operations with fuel assemblies during the refueling of BN-600 and BN-800 reactors are described. The problems of optimization of refueling process are formulated. A mathematical model of the refueling device described with the help of Lagrange equations of the second kind is presented.

Key words: fast breeder reactor; fuel assembly; nuclear refueling; model of the refueling device.

ВВЕДЕНИЕ

Характерной конструкцией реакторов типа БН является отсутствие съемной герметизирующей крышки, а перегрузка топливных сборок осуществляется без общего вскрытия корпуса герметичными дистанционно управляемыми механизмами под защитой инертного газа по закрытому тракту от реактора до внешнего хранилища. Такое решение продиктовано специфическим требованием натриевой технологии – недопустимостью контакта натрия с воздухом. Сверху корпус реактора закрыт двумя многослойными плитами (пробками) верхней радиационной защиты. Защитные пробки являются одновременно частью системы перегрузки реактора. С их помощью осуществляется наведение внутриреакторного механизма перегрузки (ВМП) на ТВС, подлежащие перегрузке, и перенос сборок внутри реактора. Эти операции выполняются совместным вращением обеих пробок – большой, перекрывающей горловину реактора, и расположенной в ней эксцентрично малой пробки, в которую вмонтирован ВМП. Обе пробки установлены на шаровых опо-

рах, имеют на периферии зубчатый венец и электромеханические приводы, обеспечивающие их вращение по командам автоматизированной системы управления [1].

МЕХАНИЗМ ПЕРЕГРУЗКИ РЕАКТОРА БН-600

Механизм перегрузки предназначен для выполнения операций по перегрузке сборок реактора (ТВС, стержней и гильз СУЗ, а также других сборок, имеющих конфигурацию ТВС). Механизм перегрузки представляет собой совокупность узлов, обеспечивающих захватывание, подъем, опускание и поворот сборок реактора. Механизм перегрузки установлен на поворотной колонне, которая в свою очередь, установлена на поворотной пробке.

Поворотные пробки состоят из двух основных частей: пробки поворотной и колонны центральной поворотной (ППр и ЦПК соответственно). ППр совместно с ЦПК выполняют роль тепловой и биологической защиты в реакторе, а также предназначены для:

- размещения механизмов перегрузки и другого необходимого оборудования;
- наведения механизма перегрузки и расходомера на заданные координаты активной зоны;
- размещения механизмов СУЗ и совмещения исполнительных механизмов СУЗ со стержнями в активной зоне реактора;

- герметизации внутренней полости реактора от внешней среды при работе установки на всех режимах;
- установки ремонтной оснастки и контейнеров при замене механизмов и оборудования.

ППр с входящей в ее гнездо ЦПК (рис. 1) установлена на опорную обечайку, которая приваривается к горловине корпуса реактора [2].

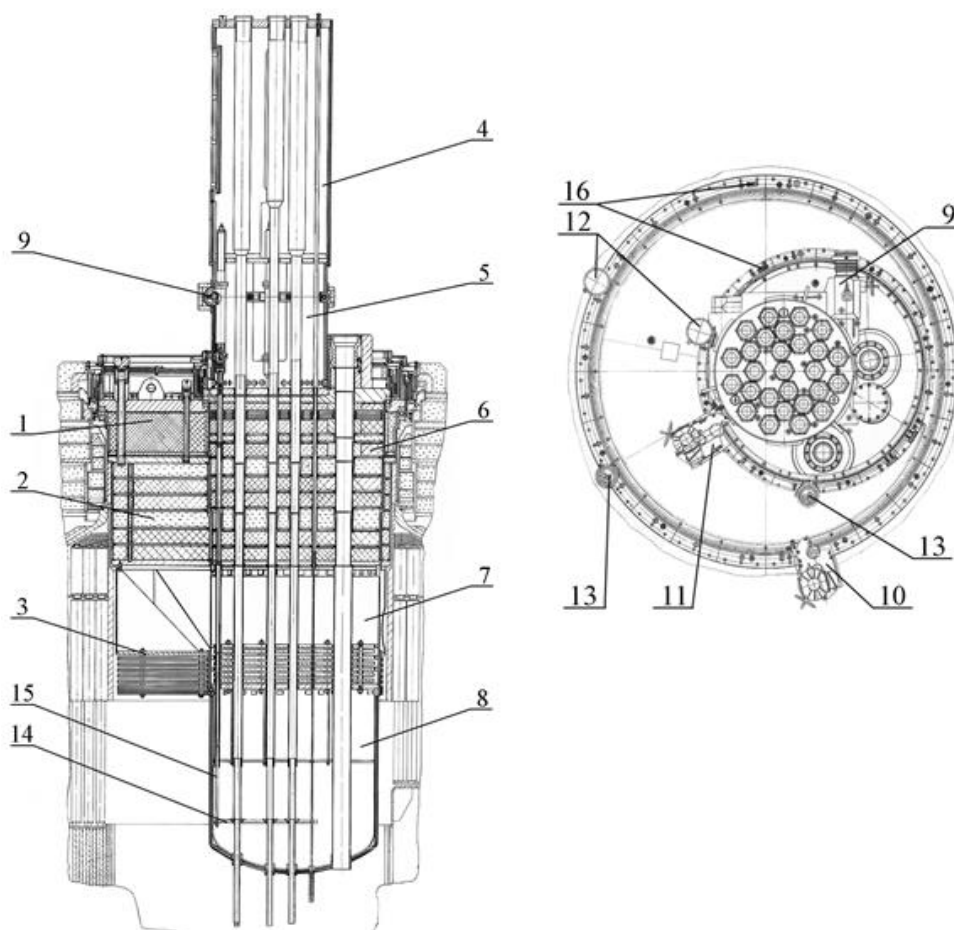


Рис. 1. Пробка поворотная с центральной колонной:

1 – верхняя часть пробки поворотной; 2 – средняя часть пробки поворотной; 3 – нижняя часть пробки поворотной; 4 – верхняя часть постаменты; 5 – нижняя часть постаменты; 6 – верхняя часть колонны; 7 – средняя часть колонны; 8 – нижняя часть колонны; 9 – привод подъема направляющих труб; 10 – привод вращения пробки поворотной; 11 – привод вращения колонны центральной поворотной; 12 – блок сельсинный (двух отсчетный); 13 – блок сельсинный (трех отсчетный); 14 – плита подвижная; 15 – тяга; 16 – конечный выключатель дублирующего уплотнения

СИСТЕМА ПЕРЕГРУЗКИ ТОПЛИВА БН-800

Система перегрузки активной зоны является комплексом механизмов и устройств, обеспечивающих, совместно с системой управления, дистанционную перегрузку сборок активной зоны реактора в границах [2]:

- для свежих сборок – от гнезда барабана свежих сборок до активной зоны реактора;
- для отработавших сборок – от активной зоны реактора до гнезда барабана отработавших сборок.

В состав сборок активной зоны входят ТВС активной зоны и зоны воспроизводства, стержни СУЗ с пенами, гильзы СУЗ с захватами, сборки стальной и борной защиты, имитаторы ТВС и другие элементы активной зоны, имеющие конфигурацию ТВС.

ОБОРУДОВАНИЕ ВНУТРИРЕАКТОРНОЙ ПЕРЕГРУЗКИ БН-800

Пробки поворотные с приводами предназначены:

- для наведения механизма перегрузки и другого оборудования на заданные ячейки активной зоны;
- размещения исполнительных механизмов СУЗ и совмещения захватов исполнительных механизмов СУЗ со стержнями СУЗ в активной зоне реактора;
- герметизации газовой полости реактора от внешней среды при работе установки на всех режимах, а также для тепловой и биологической защиты;
- установки ремонтной оснастки и контейнеров при замене и ремонте механизмов и оборудования, установленных на пробках.

В состав поворотных пробок (рис. 2) входит следующее основное оборудование: пробка большая поворотная; колонна СУЗ; пробка малая поворотная; гидрозатворы; трубы направляющие; привод пробки большой поворотной; привод колонны СУЗ; привод пробки малой поворотной; привод подъема направляющих труб; блоки датчиков.

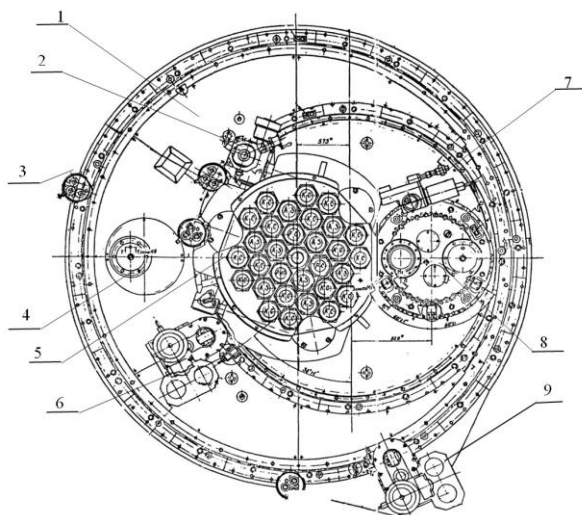


Рис. 2. Пробки поворотные с приводами (вид в плане): 1 – пробка большая поворотная, 2 – привод подъема направляющих труб, 3 – блок датчиков, 4 – пробка люка-лаза, 5 – колонна СУЗ, 6 – привод колонны СУЗ, 7 – привод малой поворотной пробки, 8 – малая поворотная пробка, 9 – привод большой поворотной пробки

Пробка большая поворотная расположена в верхней части корпуса реактора и установлена на его опорной обечайке концентрично оси корпуса. Внутри пробки большой поворотной эксцентрично её оси располагается колонна СУЗ. Внутри колонны СУЗ эксцентрично её оси расположена пробка малая поворотная. Пробки и колонна СУЗ представляют собой конструкции цилиндрической формы, состоящие из горизонтальных плит, соединённых кольцевыми обечайками.

Пробки и колонна СУЗ установлены на шариковых опорах и могут вращаться независимо одна от другой, каждая вокруг своей оси от соответствующих приводов через зубчатые венцы, установленные в верхних частях пробок и колонны СУЗ. Вращение поворотных пробок и колонны СУЗ осуществляется от электроприводов, содержащих электродвигатели с регулируемой частотой вращения, что обеспечивает перевод исполнительных органов с основной скорости движения на доводочную при подходе к точкам остановки. При выходе из строя электродвигателей, текущая операция перегрузки может быть доведена до конца с помощью ручных приводов, входящих в состав каждого привода.

В большой и малой поворотных пробках имеются проходки и посадочные места под размещение необходимого оборудования (акустических датчиков, термопреобразователей и т.д.). В пробке большой поворотной предусмотрено отверстие (люк-лаз) для проведения монтажных и наладочных работ внутри корпуса

реактора. На период физпуска в лаз предусмотрена установка пробки с пусковой аппаратурой. После пуска реактора лаз закрывается пробкой и герметизируется сваркой.

В пробке лаза выполнено гнездо для установки резервного механизма перегрузки, обеспечивающего, при необходимости, перегрузку не перегружаемых (в процессе нормальной эксплуатации реактора) сборок наружного ряда стальной защиты. Это гнездо при работе реактора закрывается пробкой. Такая же пробка установлена в резервном гнезде пробки малой поворотной. На малой поворотной пробке находятся два гнезда, в одно из которых установлен механизм перегрузки, а в другое (резервное) устанавливается, при необходимости, расходомер.

Вращением пробок поворотных механизм перегрузки наводится на заданное гнездо активной зоны. Отработавшая ТВС извлекается из активной зоны. После чего вращением поворотных пробок механизм перегрузки наводится на освободившуюся ячейку внутриреакторного хранилища (ВРХ) и устанавливает в нее ОТВС.

После этого механизм перегрузки наводится на гильзу каретки элеватора загрузки, опущенную в нижнее положение, извлекает из неё свежую ТВС, наводится на освободившуюся ячейку активной зоны и устанавливает в неё свежую ТВС.

Одновременно с этим перегрузочная машина перегрузочного бокса наводится на гильзу элеватора выгрузки, извлекает отработавшую ТВС и устанавливает ее в гнездо ротора барабана отработавших сборок (БОС). Для этого, предварительно, свободное гнездо БОС наводится под соответствующий перегрузочный канал с открытой задвижкой.

Цикл перегрузки повторяется до выгрузки в БОС требуемого количества отработавших сборок и загрузки в реактор соответствующего количества свежих ТВС.

В процессе перегрузки механизм перегрузки осуществляет также перестановку ТВС боковой зоны воспроизводства внутри активной зоны и их разворот на 180° .

Время перегрузки одной сборки при работе комплекса механизмов перегрузки в автоматическом режиме примерно 60 минут. Общее время перегрузки активной зоны реактора примерно 11 суток.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПЕРЕГРУЗОЧНОГО УСТРОЙСТВА

В целях минимизации продолжительности транспортно-технологических операций на реакторе при выполнении работ, связанных с перегрузкой ядерного топлива возникают две оптимизационные задачи. Первая задача связана с минимизацией времени по наведению захвата на ТВС. Для решения этой задачи построена математическая модель перегрузочного устройства, которая описывается с помощью следующих уравнений Лагранжа второго рода [3]:

$$J_1\varphi_1'' + m_2e_2^2\varphi_1'' + J_2(\varphi_1'' + \varphi_2'') + m_3(e_2^2\varphi_1'' + e_2e_3\cos(\varphi_2)\varphi_2'' - e_2e_3(\varphi_2')^2\sin(\varphi_2)) + J_3(\varphi_1'' + \varphi_2'' + \varphi_3'') = u_1,$$

$$J_2(\varphi_1'' + \varphi_2'') + m_3(e_3^2\varphi_2'' + e_2e_3\cos(\varphi_2)\varphi_1'') + J_3(\varphi_1'' + \varphi_2'' + \varphi_3'') = u_2,$$

$$J_3(\varphi_1'' + \varphi_2'' + \varphi_3'') = u_3.$$

Здесь φ_1 – угол поворота большой пробки; φ_2 – угол поворота средней пробки относительно большой; φ_3 – угол поворота малой пробки относительно средней; J_1 – момент инерции большой пробки относительно центра большого круга; J_2 – момент инерции средней пробки относительно ее центра масс; J_3 – момент инерции малой пробки относительно ее центра масс; m_2, m_3 – массы средней и малой пробок соответственно; e_2 – расстояние между центром масс средней пробки и центром масс большой пробки; e_3 – расстояние между центром масс средней пробки и центром масс малой пробки; u_1, u_2, u_3 – управляющие моменты, приложенные к большой, средней и малой пробкам соответственно.

С целью минимизации времени на перегрузку топлива естественно поставить задачу предельного быстродействия [4] по переходу захвата, неподвижно связанного с малой поворотной пробкой из произвольного состояния в наперед заданное состояние, соответствующее положению очередной ТВС, подлежащей перемещению.

Второй задачей является маршрутная задача по перемещению ТВС внутри реактора, которая частично рассматривалась в [5] применительно к перегрузке ТВС реактора типа ВВЭР-1000. Решение этой задачи также

будет способствовать сокращению времени выполнения операции по перезагрузке и перемещению ТВС, а в конечном итоге будет способствовать сокращению времени остановки энергоблока для перегрузки топлива.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Усынин Г.Б., Кусмарцев Е.В. Реакторы на быстрых нейтронах. – М.: Энергоатомиздат, 1985. 288 с.
2. Атомные электростанции с реакторами на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем: учебное пособие. В 2 ч. Ч. 1 / А.И. Бельтюков, А.И. Карпенко, С.А. Полуяков, О.Л. Ташлыков, Г.П. Титов, А.М. Тучков, С.Е. Щеклеин; под общ. ред. С.Е. Щеклеина, О.Л. Ташлыкова. – Екатеринбург: УрФУ, 2013. 548 с.
3. Аппель П. Теоретическая механика, т.2. М.: ФИЗМАТЛИТ, 1960.
4. Алексеев В.М., Тихомиров В.М., Фомин С.В. Оптимальное управление. М.: Наука, 1979.
5. Коробкин В.В., Сесекин А.Н., Ташлыков О.Л., Ченцов А.Г. Методы маршрутизации и их приложения в задачах повышения безопасности и эффективности эксплуатации атомных станций. М.: Изд-во "Новые технологии", 2012. 234 с.

УДК 621.039

А. Э. Лойко, Г. П. Титов, С. Е. Щеклеин

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина,
г. Екатеринбург, Россия

ИЗМЕРЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ КРИПТОНА В ВОЗДУХЕ МЕТОДОМ ТЕРМОДИФФУЗИИ

Рассматривается возможность применения метода термодиффузии для контроля и измерения малых содержаний криптона в газовых средах.

Ключевые слова: криптон; термодиффузия; измерение концентрации.

A. E. Loyko, G. P. Titov, S. Y. Shcheklein

Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

THE MEASUREMENT OF KRYPTON CONCENTRATION IN THE AIR BY THERMAL DIFFUSION METHOD

The possibility of thermal diffusion method application for the monitoring and measurement of low concentrations of krypton in gas environment is considered.

Key words: krypton; thermal diffusion; concentration measurement.

Одним из изотопов, значимых для окружающей среды, является долгоживущий изотоп криптон-85. Основным источником его поступления в атмосферу является работа предприятий ядерного топливного цикла.

Для контроля и измерения малых содержаний целевых изотопов криптона в газовых средах необходимо повышение их концентрации в анализируемых пробах.

В работе рассматривается возможность применения метода термодиффузии для решения этой задачи [1].

Экспериментальная установка содержала четыре термодиффузионные колонны (ТДК) с параметрами, приведенными в таблице 1.

Измерение содержания криптона-84 в обогащённых пробах воздуха проводилось на масспектрометре (МИ-1305).

Таблица 1

Параметры колонн термодиффузионной установки

Номер колонны	Длина l , см	Зазор δ , см	Газовый объем, см ³
1	115	3,5	150,2
2	100	4	426,3
3	100	4	426,3
4	100	4	426,3

Рассматривались различные схемы соединения колонн. При последовательном соединении колонн друг с другом в безотборном режиме работы установки увеличение концентрации криптона в обогащенной пробе составляло величину 20-24 (рис. 1). На диаграмме k – коэффициент концентрирования, равный отношению концентрации криптона в обогащённой смеси к исходной.

Более эффективным способом (на наш взгляд) работы установки являлось соединение колонн в каскад, приведенный на рис. 2. В этом случае питание установки осуществлялось в точке между колоннами 3, 4 и 2.

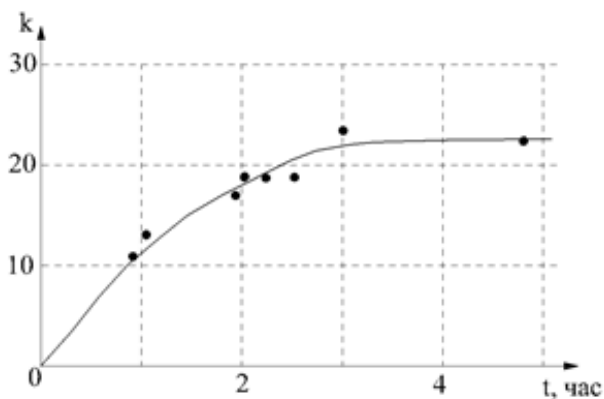


Рис. 1. Зависимость коэффициента концентрирования в безотборном режиме

Поскольку время установления стационарного состояния достаточно велико, то установка через 4-5 часов приводилась в безотборный режим работы. При работе в безотборном режиме проводилось измерение сконцентрированного криптона из воздуха в зависимости от времени работы установки. Результаты эксперимента приведены на рис. 3.

Из рис. 3 видно, что за время, равное 4-5 часам, концентрация криптона возрастает в 80-90 раз.

Результаты экспериментов показали, что метод термодиффузионного разделения позволяет значительно увеличить концентрацию криптона и может быть применён для создания устройств по концентрированию целевых изотопов криптона и ксенона с их малым содержанием в исходной газовой смеси.

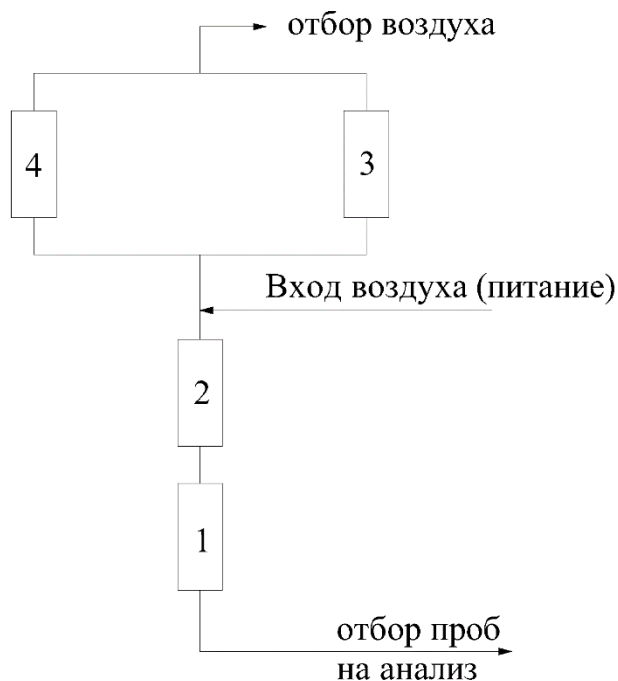


Рис. 2. Схема соединения ТДК (номера колонн соответствуют табл. 1).

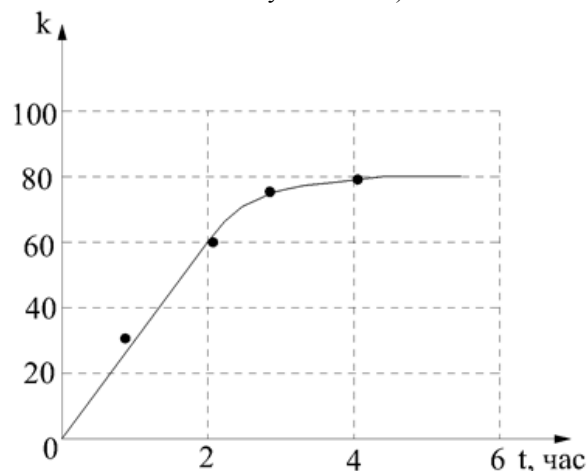


Рис. 3. Зависимость коэффициента концентрирования от времени в отборном режиме

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Робинович Г. Д. Разделение изотопов и других смесей термодиффузией. М.: Атомиздат, 1981, 142 с.
2. Титов Г.П., Лойко А.Э., Бабенок Е.А., Александрова Ф.А. Удаление долгоживущих НРГ из газовых полостей реактора типа БН // Опыт эксплуатации Белоярской АЭС. Т. 2, Свердловск, 1988.

УДК 621.039

Ю. А. Кропачев

Beloyarskaya NPP, Zarechny, Sverdlovsk reg., Russia

О. Л. Ташлыков

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина,
г. Екатеринбург, Россия

ОПТИМИЗАЦИЯ РАДИАЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ НА ЭТАПЕ ВЫВОДА ЭНЕРГООБЛОКОВ АЭС ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Приведены сведения по подготовке и выводу из эксплуатации энергоблоков АЭС в России. Даны требования к формированию базы данных по выводу из эксплуатации атомных станций в части обеспечения радиационной безопасности. Показаны пути реализации принципа оптимизации радиационной защиты при выводе из эксплуатации. Показана значимость базы данных в минимизации дозовых нагрузок персонала. Описаны элементы подсистемы автоматизированной обработки данных нерегламентных измерений радиационной обстановки на энергоблоках первой очереди Белоярской АЭС.

Ключевые слова: атомная электростанция; вывод из эксплуатации; база данных; оптимизация радиационной защиты; доза облучения.

Y. A. Kropachev

Beloyarskaya NPP, Zarechny, Sverdlovsk reg., Russia

O. L. Tashlykov

Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

OPTIMIZATION OF RADIATION PROTECTION FOR THE PHASE OF NPP POWER UNITS DECOMMISSIONING

The information on the preparation and decommissioning of nuclear power units in Russia is given. The requirements to the formation of a database on the decommissioning of nuclear power plants regarding maintenance of radiating safety are presented. The ways of implementing the principle of optimization of radiation protection during the decommissioning are shown. The importance of the database for the minimizing the personnel dose loads is shown. The elements of automated data processing subsystem of the radiation situation measurements of the first stage power units of Beloyarskaya NPP are described.

Key words: nuclear power plant; decommissioning; database; radiation protection optimization; radiation dose.

ВВЕДЕНИЕ

Деятельность АО «Концерн Росэнергоатом» по подготовке и выводу блоков АЭС из эксплуатации направлена на исключение потенциальной ядерной и радиационной опасности окончательно остановленного блока АЭС, с приведением занимаемой территории в состояние, пригодное для дальнейшего ограниченного и неограниченного использования, в соответствии с нормами радиационной и экологической безопасности, с учетом оптимизации процесса управления подготовкой к выводу и выводу из эксплуатации блоков АС.

Вывод из эксплуатации – завершающий этап жизненного цикла блока АЭС сравним по сложности и продолжительности с таким этапом, как эксплуатация. Но в отличие от эксплуатации это затратный этап жизненного цикла, который в силу своих особенностей оказывает существенное влияние на суммарные показатели эффективности объекта.

Вывод из эксплуатации блока АС – деятельность, осуществляемая после удаления ядерного топлива и ядерных материалов с блока АС, направленная на достижение заданного конечного состояния блока АС и исключающая использование блока в качестве источника энергии.

В 2016 г. в стадии снятия с эксплуатации находились энергоблоки №№ 1, 2 Нововоронежской и №№ 1, 2 Белоярской АЭС. В последующие 10 лет будут выводиться из эксплуатации энергоблоки № 3 Нововоронежской, №№ 1–4 Билибинской, №№ 1–4 Ленинградской, №№ 1 и 2 Курской АЭС. Стратегическими задачами являются формирование и внедрение на АЭС РФ референтных технологий по выводу из эксплуатации, а также оказание услуг по выводу из эксплуатации АЭС за рубежом.

Для обеспечения вывода из эксплуатации АС в нормативных документах, например, НП-012-99 «Правила обеспечения безопасности при ВЭ блока АС», РБ-013-2000 «Требования к содержанию программы ВЭ блока

АС», РД ЭО 1.1.2.25.0582- 2011 «База Данных по выводу из эксплуатации блоков атомных станций», РД ЭО 0013-93 РД ЭО 0013 «Основные положения по выводу блоков АЭС из эксплуатации», устанавливается необходимость создания базы данных.

База данных по выводу из эксплуатации блока АЭС – это совокупность документально подтвержденных и упорядоченных сведений об эксплуатации блока АС, инженерных и радиационных обследованиях, результатах расчетных исследований, проектных данных, необходимых для планирования и проведения работ по выводу из эксплуатации блока АС, а также о результатах выполнения работ на всех этапах вывода из эксплуатации (ВЭ) блока АС.

База данных должна обеспечить на этапе подготовки накопление, долговременное хранение и представление в удобном для специалистов виде информации, требуемой для выполнения проектирования и организации комплекса работ по выводу из эксплуатации. На этапе вывода из эксплуатации – разработку документов, требуемых при выводе из эксплуатации блока АС; составление отчетов о состоянии блока АС; перспективное и оперативное планирование работ по выводу блока АС из эксплуатации; контроль выполнения работ по ВЭ; планирование средств, необходимых для обеспечения работ по ВЭ; разработку технологических процессов при выводе блока АС из эксплуатации; расчет технических, экономических и других показателей технологических процессов, планируемых для применения при выполнении работ и других задач, связанных с ВЭ.

В базе данных должны быть представлены следующие направления: работа с документацией, история эксплуатации, радиационная защита персонала и трудозатраты, обращение с РАО, обращение с демонтируемым оборудованием, радиационные и технические характеристики, дезактивация оборудования и строительных конструкций.

Радиационные и технические характеристики объекта, полученные в результате комплексного инженерного радиационного обследования (КИРО) используются для разработки рекомендаций по безопасному выполнению работ по демонтажу, обращению с системами и оборудованием; для работ по консервации систем и оборудования, помещений, зданий и сооружений объекта; для определения дозозатрат персонала, и возможностей снижения их при проведении работ; для определения более эффективных технологий и технических средств дезактивации; для принятия решений по обращению с образующимися РАО. Вся информация по КИРО в хронологическом порядке должна накапливаться, дополняться и храниться в базе данных.

Для снижения дозозатрат при проведении радиационно опасных работ реализуют меры, воздействующие на факторы времени, расстояния, радиационный параметр [1, 2]. Одним из способов сокращения дозозатрат персонала за счет воздействия на фактор времени и радиационный параметр, не требующим значительных

материальных затрат, является маршрутная оптимизация работ (оптимизация траектории перемещения в нестационарных радиационных полях, последовательности демонтажа элементов радиоактивных систем) [3, 4]. Принцип оптимизации, являющийся одним из основных в обеспечении радиационной безопасности, может быть реализован несколькими путями. Одним из таких направлений является оптимизация состава гомогенных радиационно-защитных материалов (РЗМ) применительно к планируемым условиям облучения [5].

ПОДСИСТЕМА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ О РАДИАЦИОННОЙ ОБСТАНОВКЕ

Подсистема автоматизированной обработки данных нерегламентных измерений радиационной обстановки (ПАОД НИ РО) предназначена:

- для организации сбора, обработки и хранения информации о радиационных параметрах, характеризующих радиационное состояние контролируемых объектов;
- предотвращения облучения персонала выше уровней, установленных нормами и правилами РБ;
- визуального предоставления информации для своевременного принятия решений по выработке организационных, технических и защитных мероприятий для предупреждения облучения персонала, а также предотвращения загрязнения помещений;
- определения количества РАО при выводе из эксплуатации конкретных помещений, систем, оборудования.

Под нерегламентными измерениями (НИ) в рамках ПАОД РО понимаются измерения, выполненные персоналом:

- отдела радиационной безопасности (ОРБ) БАЭС по определению радиационной обстановки (мощность дозы, загрязненность, концентрация аэрозолей) на оборудовании и в помещениях первой очереди при помощи носимых и переносных приборов, результаты которых не регистрируются средствами автоматизированной системы радиационного контроля блоков 1, 2 БАЭС;
- отдела радиационной безопасности (ОРБ) БАЭС по определению РО (мощность дозы, загрязненность, изотопный состав и содержание радионуклидов в объектах внешней среды) на промплощадке, в санитарно-защитной зоне (СЗЗ) и зоне наблюдения (ЗН);
- отдела инженерно-технической поддержки эксплуатации (ОИТПЭ) и отдела ядерной безопасности и надежности (ОЯБиН) по определению радиационных характеристик (распределение мощности дозы гамма излучения, плотность потока нейтронов, активность и изотопный состав проб технологических сред) оборудования.

Нерегламентные измерения осуществляются также на промплощадке, в СЗЗ и ЗН БАЭС, в рамках решения определенных задач по подготовке к выводу и выводу из эксплуатации блоков АЭС.

В зданиях и сооружениях первой очереди БАЭС производятся либо предусмотрена возможность проведения работ, приводящих к изменению радиационной обстановки (РО) в соответствии с Технологическим регламентом.

Основными источниками ионизирующих излучений (ИИИ) на остановленных блоках 1, 2 БАЭС являются: продукты активации конструктивных элементов активной зоны, продукты коррозии контура охлаждения, фрагменты топлива в системах и оборудовании, хранящиеся в БВ-1, 2 ОТВС, загрязненные поверхности помещений и оборудование РВ, содержащие продукты деления и активации.

В здании СВО источниками являются жидкие радиоактивные среды, образующиеся в процессе эксплуатации АЭС и поступающие для очистки.

Отработавшее ядерное топливо (ОЯТ) реакторов АМБ-100 и АМБ-200 находится на временном хранении в БВ-1 и БВ-2. Для повышения безопасности хранения ОЯТ произведена установка кассет в тонкостенные нержавеющие чехлы, и ведутся работы по подготовке к его вывозу с площадки БАЭС.

Сбор информации о радиационных параметрах, характеризующих радиационное состояние контролируемых объектов, может осуществляться как с помощью

носимых приборов, так и с помощью мобильных станций сбора данных (ССД) ПАОД НИ РО.

Обработка полученных данных производится на автоматизированных рабочих местах (АРМ) оператора ПАОД НИ РО.

На АРМ оператора ПАОД НИ РО реализована визуализация информации о радиационных параметрах, характеризующих радиационное состояние контролируемых объектов в виде планов расположения контролируемых объектов, таблиц, графиков.

Также на АРМ оператора ПАОД НИ РО реализованы следующие функции:

- выбор плана контролируемого объекта;
- выбор точки контролируемого объекта;
- формирование задания на проведение НИ РО;
- просмотр журнала выполненных НИ РО;
- поиск и выбор измерения в журнале выполненных НИ РО;
- просмотр результатов выбранного измерения;
- формирование и печать отчетов на основании информации выполненных НИ РО в виде бланка стандартного протокола.

Элементы управления графического интерфейса ППО АРМ оператора ПАОД НИ РО при активной закладке «Объекты контроля» представлены на рис. 1.

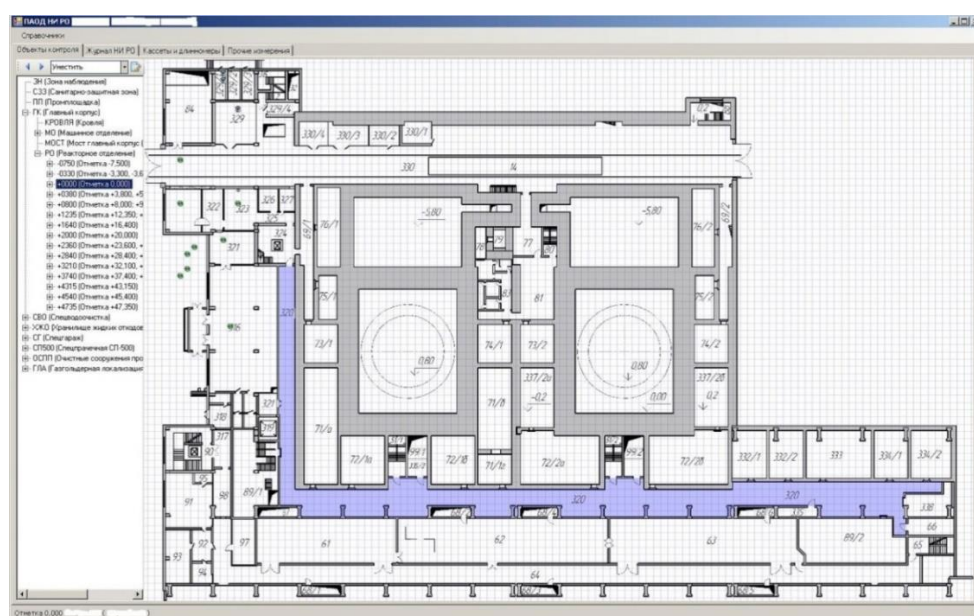


Рис. 1. Элементы управления графического интерфейса ППО АРМ оператора ПАОД НИ РО

Все точки контроля располагаются на планах объектов контроля. Для выбора точки контроля необходимо предварительно выбрать соответствующий объект контроля. Выбор объекта контроля осуществляется с помощью иерархического списка объектов контроля (рис. 2).

В соответствии с процедурой проведения НИ РО оператор выполняет на АРМ ПАОД НИ РО следующие действия:

- формирует маршрут согласно иерархии объектов контроля;
- назначает измеряемые величины и способы их получения;

- печатает задание на проведение НИ РО.

Формирование маршрута, а также назначение реквизитов измерения заключается в последовательном выборе точек контроля с занесением их в задание на проведение НИ РО (рис. 3).

Сформированный маршрут в виде задания на измерение сохраняется в базе данных (рис. 4), для сохраненного задания доступны функции печати выбранного измерения и всего задания, печать осуществляется в соответствии с формой «Бланка стандартного протокола».

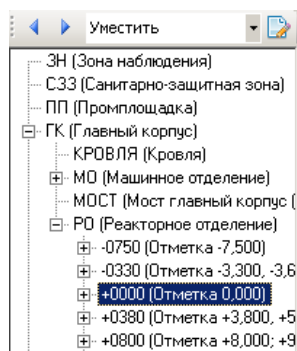


Рис. 2. Выбор объектов контроля

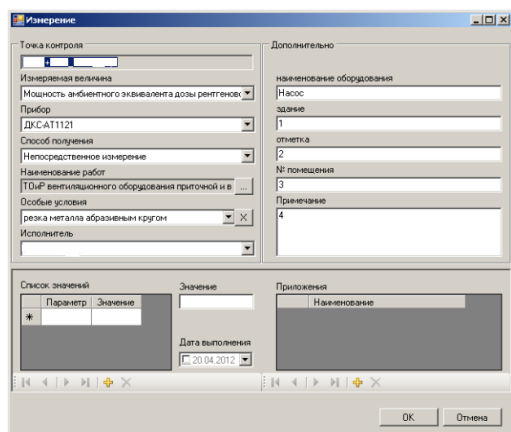


Рис. 3. Формирование маршрута

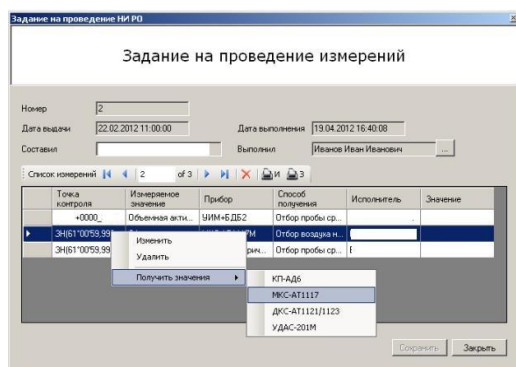


Рис. 4. Задание на проведение измерений

Учет результатов выполненных измерений распределения радиационных параметров по длинномерным объектам ведется в журнале измерений распределения радиационных параметров. Для перехода к журналу измерений распределения радиационных параметров необходимо переключиться на закладку «Кассеты и длинномеры».

Далее указываются реквизиты из выпадающих списков. Измеренные значения вводятся в таблицу «Список значений» дополнительная, уточняющая информация вводится в поле «Примечание», например, то, с каким шагом производились измерения.

ПАОД НИ РО позволяет вести учет первичных упаковок с РАО (рис. 5, 6).

ВЫПОЛНЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ

ПАОД РО предусматривает возможность автоматизированного ввода данных о РО, полученных с применением носимых и мобильных приборов ДКС-АТ1121,

ДКС-АТ1123, КП-АД6, МКС-АТ1117М и УДАС-201М, а также возможность ручного ввода результатов НИ РО, полученных путем измерений с использованием других ТС БАЭС и отбора проб с последующим лабораторным анализом.

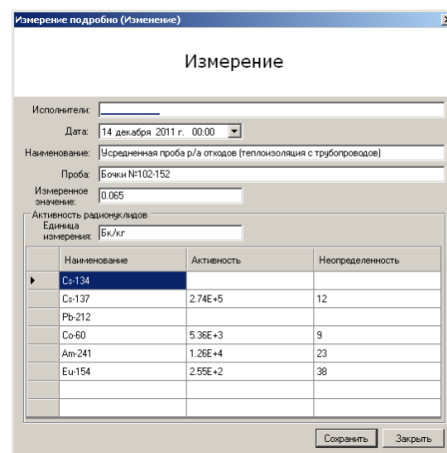


Рис. 5. Измерение

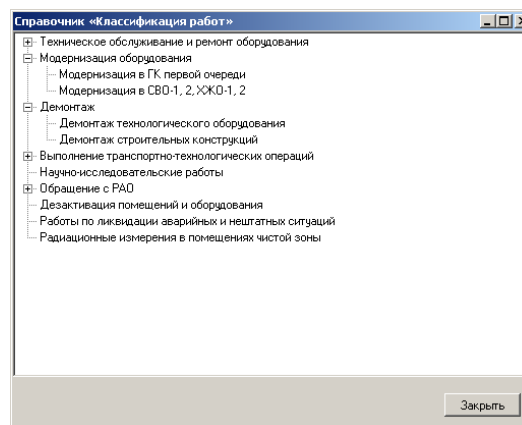


Рис. 6. Классификация работ в ПАОД НИ РО
ПАОД РО предусматривает сбор и обработку данных по следующим измеряемым параметрам:

- объемная активность (ОА) α - и β -излучающих аэрозолей, Бк/м³;
- мощность амбиентного эквивалента дозы (МАЭД) рентгеновского и гамма-излучения, Зв/ч;
- амбиентный эквивалент дозы (АЭД) рентгеновского и гамма-излучения, Зв;
- МАЭД нейтронного излучения, Зв/ч;
- поглощенная доза γ -излучения, Гр (на местности);
- плотность потока, (с⁻¹·см⁻²) и флюенс, см², нейтронного излучения;
- плотности потока α - и β -частиц, (см⁻²·мин⁻¹);
- поверхностная активность α - и β -излучающих радионуклидов, Бк/см²;
- объемная активность радионуклидов в технологических средах и жидкости, Бк/м³;
- объемная (удельная) активность радионуклидов в пробах объектов внешней среды, Бк/м³ (Бк/кг).

Способы получения данных об измеряемых параметрах:

- непосредственное измерение с помощью носимых дозиметров-радиометров;
- отбор воздуха на фильтрующую ленту с последующим оперативным измерением суммарной объемной

активности α - и β -излучающих радионуклидов с помощью блока детектирования в составе установки УДАС-201М;

- отбор воздуха на аналитический фильтр с помощью переносных пробоотборных устройств типа ПУ-5 или аналогов с последующим лабораторным анализом;
- отбор проб жидкости, технологических сред и объектов внешней среды;
- мазок (сухой, влажный, спиртовой) с последующим измерением на радиометре или лабораторным анализом.

Данные, полученные в процессе НИ РО, в зависимости от расположения точки контроля классифицируются как данные о РО: в СЗЗ; ЗН; на промплощадке; в помещениях зданий первой очереди БАЭС.

Основная часть НИ РО осуществляется с помощью носимых и мобильных ТС: ДКС-АТ1121, ДКС-АТ1123; КП-АД6, МКС-АТ1117М; УДАС-201М. Дозиметры ДКС-АТ1121, ДКС-АТ1123 применяются для измерений параметров радиационной обстановки на территории СЗЗ, ЗН, промплощадки, в помещениях БАЭС, а также для измерения радиационных параметров оборудования (в том числе длинномерного оборудования, кассет ТВС).

ПАОД РО иерархически разделена на два уровня: нижний (НУ) и верхний (ВУ). Отказы ТС ВУ не влияют на работоспособность ТС НУ и наоборот. ПАОД РО имеет распределенную структуру, состоящую из отдельных ТС, объединяемых информационными линиями связи.

Сбор информации о радиационных параметрах, характеризующих радиационное состояние контролируемых объектов производится как с помощью отбора проб, носимых и переносных приборов, так и с помощью мобильных станций сбора данных (ССД), которые используются для временного хранения измеренных значений. В ПАОД РО предусмотрена возможность использования установок УДАС-201М из состава автоматизированной системы радиационного контроля (АСРК) блоков 1, 2 БАЭС, для которых и предусматривается применение ССД.

ТС НУ представляют собой носимые и переносные (мобильные) устройства детектирования.

ПАОД РО обеспечивает автоматизированное выполнение следующих функций: формирование задания на проведение НИ РО; ввод и сохранение в базе данных результатов НИ РО; просмотр и печать результатов НИ РО; защита информации о результатах НИ РО от несанкционированного доступа; получение данных измерений, проведенных с помощью установки УДАС-201М из состава АСРК блоков 1, 2 БАЭС.

Формирование задания на проведение измерений осуществляется с помощью АРМ операторов ПАОД РО № 1, № 2. Ввод результатов НИ РО может производиться либо на основании предварительно выданного задания, либо без задания.

Ввод и сохранение результатов в базе данных ПАОД РО осуществляется следующими способами: автоматизированное считывание данных с ТС НУ; ручной

ввод результатов НИ РО; сканирование результатов выполнения НИ РО.

Отображение результатов НИ РО при просмотре осуществляется в виде: таблиц; графиков; предварительно отсканированных результатов выполнения НИ РО и текстовых комментариев.

В табличном виде могут быть представлены данные, полученные при автоматизированном считывании данных с носимых и переносных устройств, а также данные, полученные при ручном вводе результатов НИ РО.

В виде графиков могут быть представлены:

- хронология изменения объемной активности радионуклидов в жидкости выбранной скважины промплощадки;
- распределение радиационных параметров по высоте технологических объектов, например, кассет с ОТВС АМБ, длинномеров:
 - МАЭД гамма-излучения;
 - МАЭД нейтронного излучения;
 - плотности потока нейтронного излучения;
- хронология изменения МАЭД гамма-излучения (нейтронного излучения) и ОА альфа- и бета-излучающих аэрозолей в определенной точке.

Печать результатов НИ РО осуществляется в виде: бланка стандартного протокола; графиков; предварительно отсканированных результатов выполнения НИ РО.

Защита информации о результатах НИ РО от несанкционированного доступа реализуется путём разграничения прав пользователей. Каждому пользователю присваиваются заданные права из следующего списка: клиент; оператор. Учетная запись с правами «Клиент» дает право только на просмотр данных ПАОД НИ РО. Учетная запись с правами «Оператор» дает права для ввода и просмотра данных ПАОД НИ РО. Учетная запись с правами «Администратор» предоставляет возможность внесения изменений и просмотра данных ПАОД НИ РО. Пользователь с правами «Администратор» имеет возможность управления учетными записями других пользователей.

Нерегламентные измерения могут носить как разовый (например, аэрозольная активность при вырезании участка трубопровода), так и долговременный характер (например, изменение мощности дозы на сорбционном фильтре в процессе работы системы очистки воды БВ). При выполнении НИ РО может потребоваться получение информации об одном радиационном параметре как при разовых, так и долговременных измерениях или же может потребоваться определить конкретный набор параметров, характеризующий радиационную обстановку.

Задания на выполнение нерегламентных измерений могут поступать от административного персонала станции, цехов и отделов. Задание на нерегламентное измерение может предполагать выполнение единичных замеров, не требующих проведения особых подготовительных работ (измерение загрязненности в конкретном помещении или на оборудовании). Иногда

может потребоваться проведение подготовки рабочего места, разработка программ, методик, проведение необходимых согласований (например, освобождение технологических шахт центральных залов от длинномеров). НИ РО в зависимости от сложности и объема могут выполняться как одним исполнителем, как правило, дозиметристом, так и группой из нескольких специалистов.

В общем случае, при возникновении необходимости проведения НИ РО персонал ОРБ анализирует ранее проведенные аналогичные измерения в помещении, на оборудовании, местности; определяет перечень подлежащих контролю радиационных параметров; маршрут проведения измерений и количество точек контроля; необходимые для проведения измерений технические средства, проверяет их работоспособность; определяет подготовительные процедуры; подготавливает бланк измерений с картограммой и комментариями; производит выполнение инструментальных замеров, отбор проб.

Анализ выполненных ранее измерений на конкретном объекте измерений (помещение, оборудование, участок местности) необходим для предварительного определения необходимых ТС и проведения подготовительных мероприятий. Проведение предварительного анализа позволяет выполнить измерения радиационных параметров, наиболее полно отражающих состояние объекта. Анализ может выполняться персоналом ОРБ как самостоятельно, так и с привлечением персонала заинтересованных подразделений. Объем и длительность процедуры анализа зависят от сложности задания на выполнение НИ РО, требуемой оперативности получения результатов, от характера НИ РО. Особую роль в анализе играет радиационная история объекта, условия его эксплуатации. База данных ПАОД РО призвана облегчить анализ выполненных ранее измерений, сделать его более точным, оперативным и качественным. В ряде случаев такой анализ позволяет отказаться от выполнения ненужных замеров и как следствие, от дополнительных дозозатрат.

Для каждого конкретного объекта НИ РО необходимы измерения конкретного набора радиационных параметров, так, чтобы, с одной стороны, все значимые величины были измерены, с другой стороны, не выполнялись непредставительные инструментальные замеры, и не происходило засорение базы данных ненужной информацией. Выбор конкретного набора измеряемых радиационных параметров первоначально определяется заказчиком проведения НИ РО. В процессе анализа этот перечень может уточняться персоналом ОРБ (ОЯБиН, ОИТПЭ) как в сторону уменьшения, так и в сторону увеличения – в зависимости от объекта контроля, от целей проведения контроля, от условий эксплуатации объекта. Поэтому в базе данных ПАОД РО для конкретного объекта могут присутствовать различные наборы измеренных радиационных параметров. Значимые факторы, влияющие на выбор контролируемых параметров, должны отражаться в примечаниях бланка стандартного протокола НИ РО, например, «Контроль концентрации радиоактивных аэрозолей в коридоре на отм. +8,000 проводился в

связи с резкой трубопровода шлиф. машинкой». Выбор измеряемых параметров определяет также и состав персонала, необходимого для выполнения замеров, и его дозозатраты.

Определение маршрута проведения измерений и количество точек контроля проводится в зависимости от целей выполнения измерений. Для поиска локальных источников ионизирующих излучений и для планирования проведения долговременных работ потребуется более детальное обследование РО на объекте с большим количеством точек контроля.

Определение маршрута призвано обеспечить выполнение принципа ALARA при проведении измерений и минимизировать дозовые нагрузки на персонал ОРБ и других отделов, который выполняет инструментальные замеры, производит отбор и анализ проб. Для сложных измерений правильно выбранный маршрут позволяет избежать ненужного дублирования, сократить время измерений, что приводит к снижению дозозатрат операторов.

В зависимости от выполнения предыдущих пунктов определяется, какие ТС необходимо использовать для достижения поставленных целей. Определяется номенклатура средств измерения и пределы их измерения. Предпочтение при выборе ТС отдается тем, которые позволяют автоматизировано заносить результаты измерений в БД ПАОД РО (ДКС-АТ1121, ДКС-АТ1123, КП-АД6, МКС-АТ1117М и УДАС-201М). Если по каким-либо причинам их использование невозможно, применяются ТС, имеющиеся в наличии в ОРБ. К применению допускаются только поверенные ТС, указанные в соответствующих стандартах предприятия на выполнение радиационных измерений. При выборе ТС особо следует учитывать то, какие ТС применялись для ранее выполненных измерений и, по возможности, использовать те же самые, для того, чтобы исключить возможные ошибки при интерпретации результатов измерений. Если выбирается другой прибор, то в примечаниях бланка измерений должно присутствовать краткое обоснование такого выбора.

Подготовительные процедуры перед выполнением НИ РО могут заключаться в проверке работоспособности выбранной аппаратуры, а также подготовка ее к применению в нестандартных условиях. К подготовительным работам относится подготовка мазков, пробоотборников, вспомогательного инструмента (шаблонов, линеек, секундомеров и т.д.). Правильно и в полном объеме выполненные подготовительные мероприятия делают НИ РО более эргономичными, оперативными, сокращают затраты на обработку результатов, а также позволяют существенно сократить дозовые нагрузки на персонал за счет уменьшения времени пребывания в зоне воздействия источников ионизирующих излучений.

Для успешного функционирования ПАОД РО результаты НИ РО должны заноситься в бланки стандартизированной формы, поэтому наиболее важной подготовительной операцией является подготовка бланка стандартного протокола НИ РО с картограммой и комментариями.

После выполнения подготовительных действий дозиметрист производит выполнение инструментальных замеров, производит отбор проб в соответствии с заданием на выполнение НИ РО. При выполнении задания он должен соблюдать требования «Инструкции по охране труда дозиметриста», «Инструкции по радиационной безопасности при эксплуатации БАЭС», стандартов предприятия на выполнение конкретных типов измерений, инструкций по эксплуатации дозиметрической аппаратуры.

Результаты измерений заносятся в энергонезависимую память приборов ДКС-АТ1121, ДКС-АТ1123, КП-АД6, МКС-АТ1117М и УДАС-201М либо в бланк измерений в рукописном виде. В бланке стандартного протокола НИ РО должна содержаться информация: о месте проведения измерений в соответствии с классификацией; времени проведения измерения; использованной аппаратуре; примененных стандартах предприятия (методиках выполнения измерений); неопределенности измерений; условиях проведения измерений (температура, влажность); особых условиях проведения измерений (режим работы оборудования, работа вентиляции, проводимые во время измерений технологические операции и другие).

Выполнение НИ РО может производиться с предварительным формированием маршрута или без предварительного формирования маршрута. Во втором случае после получения распоряжения административно-технического персонала ОРБ о проведении НИ дозиметрист проводит необходимые измерения в заданных точках контроля, фиксирует точки контроля и результаты измерения. Дозиметрист осуществляет ввод полученных значений в базу данных ПАОД НИ РО с фиксацией маршрута, времени измерений и докладывает лицу, выдавшему задание о выполнении измерений.

Административно-технический персонал ОРБ анализирует результаты НИ РО.

Информационное обеспечение представляет собой совокупность баз данных и наборов данных, используемых для реализации заданных функций, и является составной частью ПАОД НИ РО.

Информационное обеспечение ПАОД РО состоит из базы данных ПАОД НИ РО; электронных журналов измеренных значений; файловых архивов измеренных значений объемной активности альфа- и бета-излучающих аэрозолей, полученные с помощью мобильной установки типа УДАС-201М; внешней базы данных.

База данных ПАОД РО находится на СБД ПАОД РО и предназначена для ввода, хранения и предоставления данных, полученных в результате выполнения НИ РО.

Электронные журналы измеренных значений находятся в энергонезависимой памяти приборов, с помощью которых проводится выполнение НИ РО. Электронные журналы предназначены для хранения измеренных значений и последующего их считывания и внесения в базу данных ПАОД НИ РО.

Файловые архивы измеренных значений объемной активности альфа- и бета-излучающих аэрозолей находятся на дисковых накопителях мобильных ССД. Файловые архивы предназначены для хранения измеренных значений объемной активности альфа- и бета-излучающих аэрозолей и последующего их считывания и внесения в базу данных ПАОД НИ РО.

Внешняя база данных представляет собой файлы резервных копий основной базы данных. Внешняя база данных находится на компьютере администратора ПАОД НИ РО.

Для организации базы данных ПАОД РО используется программное обеспечение фирмы Microsoft – Microsoft SQL Server 2008. Управление базой данных ПАОД РО производится средством администрирования, входящим в Microsoft SQL Server 2008 – SQL Server Management Studio.

Электронные журналы измеренных значений организуются при помощи встроенного программного обеспечения ТС НУ.

Основные операции по управлению электронными журналами, такие как добавление, просмотр и удаление информации также реализованы во встроенном программном обеспечении ТС НУ.

Файловые архивы организуются при помощи программы сбора данных, установленной на ССД.

В процессе работы ПАОД РО периодически создаются резервные копии основной базы данных ПАОД НИ РО, которые сохраняются администратором системы на другом компьютере в сети. Таким образом организуется внешняя база данных ПАОД НИ РО, содержащая архивы системы.

В ПАОД РО информация о результатах проведения НИ РО хранится централизованно на СБД ПАОД РО в базе данных Microsoft SQL Server. При необходимости использования информации о результатах проведения НИ РО в других системах, информацию из базы данных можно получать путем запросов на основе языка Transact SQL.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как уже было сказано выше, указанная подсистема позволяет минимизировать дозовые нагрузки на персонал ОРБ и других отделов при выполнении измерений, наряду с этим появляется возможность планировать радиационно-опасные работы по демонтажу оборудования, а также транспортировке демонтированного оборудования и дальнейшее обращение с РАО с учетом принципа ALARA. В настоящее время на Белоярской АЭС создан опытный образец подсистемы нерегламентных измерений радиационной обстановки, по результатам эксплуатации опытного образца будет выполнена доработка программного обеспечения и, при необходимости, технических средств. В перспективе данная подсистема должна быть интегрирована в информационную систему по выводу из эксплуатации, которая в свою очередь будет представлять собой базу данных по выводу из эксплуатации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Наумов А.А., Ташлыков О.Л. Минимизация дозовых затрат при ремонтном обслуживании систем и оборудования АЭС // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2010. № 1. С. 80-88.
2. Ташлыков О.Л., Щеклеин С.Е., Булатов В.И., Шастин А.Г. О проблеме снижения дозовых затрат персонала АЭС // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2011. №1. С.55-60.
3. Ташлыков О.Л. Дозовые затраты персонала в атомной энергетике. Анализ. Пути снижения. Оптимизация: монография. Saarbrücken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. RG. 2011. 232 с.
4. Балущкин Ф.А., Сесекин А.Н., Ташлыков О.Л., Чеблоков И.Б., Щеклеин С.Е., Ченцов А.Г. Использование метода динамического программирования для оптимизации демонтажа оборудования энергоблоков АЭС, выводимых из эксплуатации, с целью минимизации облучения // Известия вузов. Ядерная энергетика. -2009. №4. С.169-176.
5. Ташлыков О.Л., Щеклеин С.Е., Лукьяненко В.Ю., Михайлова А.Ф., Русских И.М., Селезнев Е.Н., Козлов А.В. Оптимизация состава радиационной защиты // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. 2015. № 4. С. 36-42.

УДК 621.039.536

А. И. Бельтюков, А. И. Карпенко

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина,
г. Екатеринбург, Россия

П. П. Говоров, А. М. Тучков

Белоярская АЭС, г. Заречный Свердловской обл., Россия

ОПЫТ ПРОВЕДЕНИЯ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ РАБОТ НА ЭНЕРГОБЛОКЕ БН-600

В статье представлены результаты основных расчетных и экспериментальных исследований, проведенных авторами в периоды пуска энергоблока с реактором БН-600 и освоения его мощности. Полученные данные использованы при разработке проектов новых АЭС с быстрыми натриевыми реакторами БН-800 и БН-1200.

Ключевые слова: теплогидравлика; эффект реактивности; активная зона; эффективность стержней СУЗ; парогенератор; гидродинамическая неустойчивость.

A. I. Beltukov, A. I. Karpenko

Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

P. P. Govorov, A. M. Tuchkov

Beloyarskaya NPP, Zarechny, Sverdlovsk reg., Russia

THE EXPERIENCE OF RESEARCH WORK AT BN-600 POWER UNIT

The article presents the results of the major theoretical and experimental studies conducted by the authors during commissioning, start-up and the development of the capacity of the unit with BN-600. The data received were used for the development of the projects of new nuclear power plants with fast neutron reactor BN-800 and BN-1200.

Key words: thermal hydraulics; reactivity effect; reactor core; control rods efficiency; steam generator; hydrodynamic instability.

Результаты научно-исследовательских работ, проведенных на уникальном энергоблоке БН-600 с реактором на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем, имеют важное значение для обеспечения безопасности и совершенствования режимов его эксплуатации, а также для использования при проектировании подобных энергоблоков следующих поколений.

Обработка и анализ результатов расчетных и экспериментальных исследований основных физических и теплогидравлических характеристик всех контуров и их основного оборудования, проведенных в рамках

обеспечения инженерно-испытательной и расчетной поддержки пуска, освоения мощности и эксплуатации энергоблока с реактором БН-600 на быстрых нейтронах большой мощности с интегральной компоновкой первого контура позволяют сформулировать основные выводы (п.п. 1-10 [1, 2]; п.п. 11-21 [3]; п.п. 22-27 [4]; п.п. 28-33 [5]):

1. Показано существование в первом контуре секторного (автономного) течения теплоносителя, при котором происходит только слабое перемешивание петле-

вых потоков теплоносителя в напорной и верхней смешительной камерах. С учетом обнаруженного секторного течения теплоносителя изменена схема аварийной защиты реактора по увеличению температуры теплоносителя на выходе из активной зоны. Предложено, обосновано и внедрено в эксплуатацию регулирование распределения тепловой мощности реактора по петлям первого контура изменением частот вращения главных циркуляционных насосов первого контура (ГЦН-1) с соблюдением условий и пределов нормальной эксплуатации и с учетом секторного течения теплоносителя. Экспериментально получены основные количественные зависимости между изменениями теплогидравлических параметров контуров и значение предельно допустимой разности частот вращения ГЦН-1, что позволило обеспечить достижение номинальной мощности реактора и эксплуатацию реактора на этом уровне мощности.

2. Разработана и внедрена методика расчета и контроля тепловой мощности реактора по параметрам второго и третьего контуров. Получена зависимость величины сигнала натриевых магнитных расходомеров от температуры теплоносителя для трубопроводов большого диаметра (~ 300 мм), которая введена в методику расчета расхода теплоносителя по второму контуру.

3. Определены скорости отвода тепла от активной зоны в режимах расхолаживания реактора для различного сочетания работающего основного оборудования и допустимые времена прекращения циркуляции теплоносителя по третьему контуру для проведения ремонтных работ. Разработан и внедрен в эксплуатацию регламент отвода остаточного тепловыделения от активной зоны. Измерения остаточного тепловыделения отработавших сборок различного типа на разработанном стенде показали достаточную для практического применения точность и возможность использования стенда для верификации расчетных программ.

4. Получены основные теплогидравлические характеристики прямоточных секционных парогенераторов «натрий-вода», в том числе зависимости между расходом теплоносителя по второму контуру и частотой вращения главных циркуляционных насосов второго контура (ГЦН-2) для каждой петли с учетом числа отключенных модулей и секций парогенераторов. Показано, что проектное значение номинального расхода теплоносителя по второму контуру достигается при значительно более низкой частоте вращения ГЦН-2, чем указано в проекте энергоблока. Выявлена и реализована возможность увеличения допустимой мощности парогенераторов до 105 % номинальной, секций и модулей парогенераторов – до 126 % номинальной. Обоснован и внедрен режим работы парогенератора с одной и двумя отключенными секциями без снижения мощности парогенератора и реактора. Экспериментально доказано, что для исключения попадания влаги в пароперегреватель перегрев пара на выходе из испарительного модуля не должен быть ниже 17 °С. Получена зависимость граничного паросодержания в слабоперегретом паре от основных режимных параметров парогенератора.

5. Разработана и внедрена методика определения относительной эффективности компенсирующих стержней (КС) системы управления и защиты (СУЗ) методом относительного взвешивания. Предложенные метод относительного взвешивания КС и комбинированный метод определения их полной эффективности могут быть использованы как дополнительные к штатному методу измерения эффективности органов СУЗ, сокращающие затраты реакторного времени на проведение измерений. Показано увеличение неравномерности распределений относительной эффективности КС на энергетической мощности при ее росте и работающей системе автоматического регулирования мощности. Установлено, что увеличение мощности реактора приводит к росту относительной эффективности КС вблизи блока ионизационных камер, а вдали от него – к её уменьшению.

6. Предложен метод анализа азимутальных распределений относительных эффективностей КС для любых, начиная с минимально контролируемого, уровней мощности реактора БН-600. Этот метод может быть использован для анализа распределений параметров любых систем с симметричным относительно центра активной зоны распределением их элементов.

7. Доказано существование в активной зоне реактора БН-600 пространственно-мощностного эффекта реактивности (ПМЭР) на энергетической мощности из-за одноточечной схемы контроля потока нейтронов утечки. Получены эмпирические линейные зависимости, связывающие изменение мощности реактора с величиной и направлением перемещения каждого компенсирующего стержня. Показано, что из-за ПМЭР величина изменения мощности реактора зависит не только от величины и знака вносимого возмущения по реактивности, но и от места его внесения. Зависимость величины ПМЭР от радиуса размещения стержней СУЗ приводит к необходимости учета этого эффекта при проектировании и эксплуатации быстрых реакторов с большими размерами активной зоны или к переходу на многоточечную (не менее трех) схему контроля плотности потока нейтронов утечки.

8. Разработана и успешно опробована методика поиска негерметичной по топливу ТВС на энергетической мощности с учетом ПМЭР, основанная на внесении локальных возмущений по реактивности в активную зону перемещением компенсирующих стержней. Такая методика может быть использована и на новых реакторах БН, включая БН-800.

9. Подготовлена и впервые проведена в быстром реакторе большой мощности опытная наработка радионуклида кобальт-60 в активной зоне и в боковой зоне воспроизводства в промышленных масштабах с необходимым качеством в сроки, гораздо меньшие, чем в тепловых реакторах; испытания проведены с соблюдением условий и пределов нормальной эксплуатации. Полученные результаты рекомендовано использовать в полной мере для строящегося реактора БН-800 при обосновании производства Со-60 в нем в качестве штатного режима, что может повысить экономичность эксплуатации и способствовать увеличению назначенного ресурса реактора.

10. Разработан комплекс методик и программ проведения измерений и расчетов параметров и характеристик контуров, элементов активной зоны, основного оборудования контуров. Комплекс опробован при пуске, освоении мощности и эксплуатации энергоблока БН-600 и может быть рекомендован для использования на проектируемых и строящихся энергоблоках с реакторами на быстрых нейтронах, в первую очередь, на энергоблоке БН-800.

11. При экспериментальном изучении гидравлических характеристик второго натриевого контура установлено, что гидравлические характеристики всех петель теплообмена ниже проектных. Номинальный расход теплоносителя во втором контуре был достигнут при меньших (750 об/мин) по сравнению с проектом (970 об/мин) частотах вращения ГЦН-2.

12. Распределение расходов теплоносителя через секции парогенераторов (ПГ) равномерное. Относительное отклонение расходов натрия по секциям в различных режимах составляет $\pm 5\%$ от среднего значения при различном числе работающих секций, что обеспечивает длительную работоспособность ПГ при проектных параметрах в течение заданного ресурса.

13. Отмечено, что во втором натриевом контуре при выводе ГЦН-2 на номинальные частоты вращения возникали повышенные колебания уровней в баках ББН (бак буферный натриевый) и ГЦН-2, повышение нагрузки электропривода ГЦН-2. Исследование причин колебания уровней показали, что это вызвано процессами захвата защитного газа, переноса его по натриевому контуру и выход его в ББН. Определена граница захвата газа из ББН в зависимости от режимных параметров контура, обоснован выбор частот вращения ГЦН-2 и уровней в ББН для обеспечения нормальной теплотехнической эффективности поверхности ПГ из-за ухудшения теплообмена при прохождении защитного газа по контуру циркуляции.

14. Показано, что неравномерности температур по сечению трубного пучка не превышают допустимых проектных значений и напряжения, возникающие в районе верхней трубной доски, незначительные. По результатам проведенных измерений были изменены требования эксплуатации систем электрообогрева и внесены изменения в инструкцию по эксплуатации ПГ. При прогреве секции ПГ до 150°C делается временная выдержка в течение 10 часов вместо 4 часов по проекту для выравнивания температур по сечению трубного пучка. Изменен алгоритм разогрева модулей ПГ: температурные уставки электрообогрева верхней части модулей устанавливаются на $10\div 20^\circ\text{C}$ ниже, а в нижней на $10\div 20^\circ\text{C}$ выше, чем в средней части модулей.

15. Изучение температурных режимов испарительных модулей (ИМ) на различных уровнях мощности парогенератора показало наличие неравномерного температурного поля по окружности корпуса ИМ. Полученные неравномерности температур меньше величин, заложенных в проекте, т. е. они не оказывают влияния на длительную работоспособность ПГ.

16. Проведено экспериментальное изучение локальных тепловых потоков в месте кризиса теплоотдачи в ИМ. Определено влияние режимных параметров (расходов натрия и воды, температур натрия на входе-выходе в модуль, температуры питательной воды, давления пара за ИМ) на величину максимального теплового потока в ИМ, могущего оказать интенсифицирующее действие на коррозионные процессы и ресурс парогенерирующих труб. Установлена неоднозначная зависимость максимального теплового потока при увеличении мощности ПГ при пуске энергоблока: до уровня мощности 80% номинальной максимальный тепловой поток увеличивается, а после 80% снижается, что связано с изменением давления пара за испарителями и расхода питательной воды. Даны рекомендации по неперевышению допустимой величины максимального теплового потока.

17. Выявлены значительные неравномерности распределения температур пара как по радиусу, так и по окружности на выходе из трубного пучка ИМ, достигающие $\pm 25^\circ\text{C}$. Это связано с неравномерным течением натрия в межтрубном пространстве ИМ, а также наличием гидравлической разверки питательной воды в трубках ИМ. Разность температур металла трубок при таком разбросе температур пара составляет всего 6°C . Возникающие термические напряжения при этом не превышают величин, заложенных в проекте.

18. Установлено, что поток пара на выходе из трубного пучка ИМ содержит влагу во всех режимах эксплуатации. Определено влияние основных параметров ИМ (массовой скорости пароводяного потока; удельного теплового потока в зоне доупаривания влаги; температуры питательной воды; температуры натрия на входе в ИМ; давление и перегрев пара за ИМ на вынос влаги из трубного пучка.

Доказано, что при перегревах более 17°C и массовой скорости пароводяного потока $\rho w = 554 \text{ кг}/(\text{м}^2\cdot\text{с})$ не наблюдается попадания влаги в пароперегревательные модули (ОП).

По результатам экспериментов и проведенных расчетов определена граничная кривая отсутствия попадания влаги в модули ОП. Для номинального расхода питательной воды через ПГ ($\rho w = 690 \text{ кг}/\text{м}^2\cdot\text{с}$) получена минимальная величина перегрева пара ($\Delta t_{\text{пв}}$) за ИМ, равная 10°C .

19. Определены резервы повышения мощности секций и модулей. Испытания показали, что при повышении мощности секции ПГ до 126% номинальной и соблюдении предусмотренных ограничений параметров, условия работы модулей не ухудшились, а по ряду показателей (величина максимального теплового потока, уровень температур металла в ИМ) улучшились.

Повышение тепловой мощности секций до 126% (с учетом принятых ограничений) при выводе в ремонт отдельных секций ПГ обеспечивает более гибкое регулирование распределения мощности между петлями, повышает устойчивость несения электрической нагрузки блоком.

Результаты работы внедрены в эксплуатацию. Условия работы ПГ внесены в технологический регламент блока № 3 Белоярской АЭС, инструкции по эксплуатации блока № 3 и парогенератора ПГН–200М.

20. Обоснована безопасность режимов подключения секций к работающему ПГ на основе разработанной расчетной модели парогенератора для переходных режимов. Доказано, что номинальный уровень мощности ПГ для подключения секции является наиболее предпочтительным.

Проведенные расчеты переходных режимов по условиям испытаний показали хорошее согласие с экспериментальными данными. Для переходных режимов ПГ, оценки температур во времени, скоростей изменения параметров с достаточной степенью точности можно пользоваться разработанной методикой расчета динамики элементов ПГ.

Проведенная серия испытаний по подключению секций к работающему ПГ показала возможность безопасного ведения режима при создании поэтапной циркуляции сред в отдельных модулях секции ПГ.

21. Показано, что по достижению значения предельно допустимой величины удельной загрязненности 350 г/м^2 можно установить оптимальные межпромывочные периоды ПГ. На ранней стадии эксплуатации ПГ до $40 \div 50$ тыс. часов величина межпромывочного периода должна быть не более 20 тыс. часов. При увеличении наработки ИМ до 70 тыс. часов – не более 15 тыс. часов, а при наработках до 105 тыс. часов – не более $10 \div 11$ тыс. часов.

Определены величины срока службы ИМ на основе данных по глубинам язв и определения влияния времени наработки испарителей и времени стоянки. Максимальный ресурс ИМ, оцененный по средней величине глубин язв, составляет $150 \div 160$ тыс. часов. Минимальный срок службы по консервативной оценке составляет $103 \div 106$ тыс. часов.

22. Установлено, что значение выходной относительной энтальпии потока на границе области неустойчивости для ИМ с одинаковой продолжительностью эксплуатации зависит в основном от величины выходного давления при заданном коэффициенте входного дросселирования и геометрии гидравлического тракта.

23. Обнаружен эффект влияния длительности эксплуатации на устойчивость ИМ вследствие накопления значительных отложений на теплообменной поверхности со стороны пароводяного потока. На протяжении всего срока эксплуатации испарителей происходит увеличение области гидродинамической неустойчивости примерно на 25 % по сравнению с исходным состоянием.

24. Получены количественные зависимости, позволяющие учесть влияние отложений на возникновение гидродинамической неустойчивости в области больших значений выходной относительной энтальпии потока.

25. Разработана методика для расчета границ области неустойчивости при больших значениях выходной относительной энтальпии с учетом состояния теплообменной поверхности трубок прямоточных парогенераторов. Методика позволяет проводить оценку границы области неустойчивости в зависимости от величины отложений в теплообменных трубках и выполнять прогнозные оценки по изменению границы области гидродинамической неустойчивости от времени эксплуатации объекта.

26. Разработанная методика позволила выполнить расчет максимального ресурса ИМ по условию возможности обеспечения их устойчивой работы на протяжении всего срока эксплуатации, эта величина составила $150 \div 160$ тыс. ч.

27. Проведен анализ устойчивости ИМ в пусковом режиме и разработаны рекомендации по предотвращению режимов с неустойчивостью потока, заключающиеся в ограничении максимальной температуры пара на выходе из ИМ в зависимости от уровня мощности и величины выходного давления пара.

28. Проведено обоснование возможности определения относительной эффективности КС на уровнях мощности реактора до 97 % $N_{\text{ном}}$ без превышения допустимых параметров эксплуатации ТВС и номинального уровня тепловой мощности реактора при перемещении КС на ± 60 мм от исходного положения. Метод локальных возмущений поля энерговыделения при перемещении КС на ± 60 мм может использоваться для обнаружения негерметичных ТВС без существующего при этом ограничения (≤ 70 % $N_{\text{ном}}$) на уровень мощности реактора.

29. Расчетные значения эффективности стержней СУЗ значительно (до 20 %) отличаются от соответствующих измеренных значений. Наибольшие отклонения имеют стержни, расположенные в зоне малого обогащения, где сильнее выражен эффект интерференции.

30. Определена зависимость коэффициента интерференции системы КС от положения системы КС в активной зоне реактора БН-600.

31. Предложен алгоритм отключения петли без сброса стержня АЗ-П, исключающий локальное снижение мощности ТВС на 14 % от заданного значения в районе АЗ-П и общий перекося поля энерговыделения по активной зоне.

32. Показана возможность перехода на поглощающие элементы стержней аварийной защиты (АЗ) с уменьшенным обогащением В₄С по ¹⁰B без существенного снижения эффективности системы СУЗ реактора БН-600. Снижение затрат на изготовление таких стержней АЗ может составлять до 50 % их стоимости по сравнению с изготовлением проектных стержней АЗ.

33. Результаты расчета локальных возмущений поля энерговыделения, вносимых в активную зону реактора БН-600 облучательными сборками (ОС), предназначенными для попутной наработки радионуклида Со-60, использованы для обоснования безопасной эксплуатации ОС.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Исследование теплогидравлических характеристик реактора БН-600 Белоярской АЭС / А. Г. Шейнкман и др. // Атомная энергия, 1987. Т.62, вып. 6. – С. 375-379.
2. Атомные электростанции с реакторами на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем: учебное пособие. В 2 ч. Ч. 2 / А.И. Бельтюков, А.И. Карпенко, С.А. Полуяков, О.Л. Ташлыков, Г.П. Титов, А.М. Тучков, С.Е. Щеклеин; под общ. ред. С.Е. Щеклеина, О.Л. Ташлыкова. – Екатеринбург: УрФУ, 2013. – 420 с.
3. Оптимизация и разработка новых режимов эксплуатации секционного парогенератора «натрий – вода» (на примере энергоблока БН-600) / А.И. Бельтюков / Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук // Заречный: Белоярская АЭС, 2000. – 154 с.
4. Гидродинамическая устойчивость секционных парогенераторов с натриевым обогревом (на примере энергоблока №3 Белоярской АЭС) / П. П. Говоров / Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук // Заречный: Белоярская АЭС, 2000. – 115 с.
5. Нестационарные процессы и пространственные возмущения в активной зоне интегрального натриевого реактора большой мощности (на примере Белоярской АЭС) / А.М. Тучков / Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук // Заречный: Белоярская АЭС, 2000. – 113 с.

УДК 621.039

А. В. Ровнейко

Белоярская АЭС, г. Заречный Свердловской обл., Россия

О. Л. Ташлыков, С. Е. Щеклеин

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия

ОСОБЕННОСТИ ВЫВОДА ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ РЕАКТОРОВ
НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ

Описаны особенности этапа вывода из эксплуатации как заключительной стадии жизненного цикла АЭС. Представлены общие характеристики АЭС с реактором БН-350. Описана стратегия вывода из эксплуатации реакторной установки БН-350 (РУ БН-350). Обобщен опыт выполненных работ по выводу из эксплуатации АЭС с БН-350. Приведены особенности проведения работ по очистке радиоактивного натрия от цезия-137, дренажированию теплоносителя из корпуса реактора. Представлены планируемые работы в рамках вывода РУ БН-350 из эксплуатации.

Ключевые слова: вывод из эксплуатации; реактор на быстрых нейтронах; натрий; цезий-137; удельная активность; дренажирование натрия из корпуса реактора.

А. V. Rovneiko

Beloyarskaya NPP, Zarechny, Sverdlovsk reg., Russia

O. L. Tashlykov, S. E. Shcheklein

Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

THE FEATURES OF THE FAST NEUTRON REACTORS DECOMMISSIONING

The features of the decommissioning phase as the final stage of the NPP life cycle are described. The general characteristics of a NPP with BN-350 nuclear reactor are presented. The strategy of decommissioning of BN-350 reactor facility is described. The experience of the executed works on the decommissioning of a nuclear power plant with BN-350 is summarized. Peculiarities of the radioactive sodium cleaning from cesium-137 and the coolant draining from the reactor vessel are given. The list of planned works in terms of BN-350 decommissioning is presented.

Key words: decommissioning; fast breeder reactor; sodium; cesium-137; specific activity; sodium drainage from the reactor vessel.

ВВЕДЕНИЕ

Вывод из эксплуатации – это сравнительно новая и быстро развивающаяся сфера деятельности в странах, имеющих объекты использования атомной энергии. Под *выводом из эксплуатации* ядерной установки понимают меры, принимаемые с целью снятия с установки всех или некоторых регулирующих требований.

В ряде международных документов, переведенных на русский язык, термин «вывод из эксплуатации» (decommissioning) переводится как «снятие с эксплуатации». Здесь и далее мы будем использовать термин «вывод из эксплуатации», который применяется в российском законодательстве. МАГАТЭ рассматривает вывод из эксплуатации в качестве одного из этапов

жизненного цикла ядерной установки, который, как и другие этапы, требует получения разрешений со стороны регулирующих органов. В «Специальном руководстве по безопасности SSG-12» [1] приводятся следующие этапы жизненного цикла: размещение и оценка площадки; проектирование; строительство; ввод в эксплуатацию; эксплуатация; вывод из эксплуатации.

Выбор подходящего варианта вывода из эксплуатации (ВЭ) для конкретного блока АЭС осуществляется на основе многофакторного анализа, при котором необходимо рассмотреть ряд как общих для всех АЭС, так и конкретных факторов, присущих именно этому объекту. Эти факторы охватывают вопросы безопасности, охраны окружающей среды и здоровья населения, стоимости работ, социально-экономического воздействия на положение региона, наличия необходимых финансовых, технических, материальных и людских ресурсов и т. д.

В настоящее время в стадии вывода из эксплуатации находятся энергоблоки № 1, 2 Белоярской (остановлены в 1983 и 1989 гг.) и Нововоронежской (остановлены в 1984 и 1990 гг.) АЭС. В недалеком будущем будут выводиться из эксплуатации энергоблоки АЭС, пущенные в эксплуатацию в 1970–80-е годы с учетом продления их проектного срока эксплуатации, в том числе энергоблок № 3 Белоярской АЭС с реактором на быстрых нейтронах (энергопуск 08.04.1980 г.). Отличительной особенностью работ по выводу из эксплуатации реакторной установки (РУ) БН-600 от РУ с водным теплоносителем является наличие больших объемов жидкометаллического натрия [2].

В мировой практике опыт вывода из эксплуатации промышленных реакторов на быстрых нейтронах и комплексной переработки РАО, в том числе жидкометаллического натрия, незначителен.

В представленном докладе обобщен опыт работ по выводу из эксплуатации РУ БН-350. Особое внимание уделено вопросам переработки или перевода в пассивное состояние основных объемов натрия и сплава натрий-калий для перевода РУ в состояние «SAFSTOR» – состояние долговременного безопасного хранения под наблюдением для снижения уровня радиоактивности за счет распада перед проведением работ по ее окончательному демонтажу.

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Промышленный реактор на быстрых нейтронах БН-350 входит в состав Мангистауского атомного энергокомбината (МАЭК-Казатомпром), расположен в республике Казахстан на полуострове Мангышлак на берегу Каспийского моря в районе города Актау (Шевченко). Комбинат входит в состав Казахской национальной атомной компании «Казатомпром» и осуществляет производство и снабжение региона электрической и тепловой энергией, а также питьевой, горячей, технической (для хозяйственных нужд) водой. Комбинат спроектирован и построен как единый энерго- и водо-производящий комплекс, включающий

наряду с реактором три тепловые электростанции и многокорпусные дистилляционные опреснительные установки.

РУ БН-350 введена в эксплуатацию в 1973 г. и успешно проработала 25 лет до 1998 г. Проектная тепловая мощность реактора составляла 1000 МВт (эквивалентная электрической мощности 350 МВт). Но реально максимальный уровень мощности не превышал 750 МВт, при этом средняя мощность за время эксплуатации составила ~ 580 МВт (рис. 1). Время работы реактора на мощности составило 169 934 часов, число перегрузок – 63, производительность по пару 1070 т/ч. Работа реактора характеризовалась высоким коэффициентом использования рабочего времени, который составил за весь период эксплуатации 0,88.

ЭТАПЫ ВЫВОДА ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ РУ

Реактор БН-350 был окончательно остановлен 22 апреля 1999 г. во исполнение Постановления Правительства Республики Казахстан № 456 «О выводе из эксплуатации реактора БН-350 в городе Актау Мангистауской области». В соответствии с вышеуказанным Постановлением реактор должен быть приведен в состояние безопасного и длительного хранения сроком на 50 лет с последующим демонтажем и захоронением, при котором он представляет минимальный риск для окружающей среды, населения и персонала.

Постановлением Правительства Республики Казахстан определена концепция, которая предусматривает вывод из эксплуатации РУ БН-350 в три этапа:

1. Приведение РУ БН-350 в состояние безопасного хранения.
2. Безопасное хранение.
3. Частичный или полный демонтаж оборудования, зданий, сооружений и захоронение РАО.

Выбор концепции безопасного хранения определен исходя из экономических условий в Республике Казахстан с целью минимизации финансовых и материальных затрат на вывод установки из эксплуатации. Кроме того, выполнение работ по полному демонтажу установки (включая демонтаж реактора и оборудования первого контура) связано с большими дозовыми нагрузками на персонал из-за высокой наведенной активности конструкционных материалов.

Одним из преимуществ концепции «отложенного демонтажа» является минимизация количества радиоактивных отходов, образующихся при приведении установки в состояние безопасного хранения (по сравнению с полным демонтажем установки). Это преимущество является достаточно важным, учитывая нерешенность в настоящее время вопроса с захоронением РАО в регионе.

Вывод из эксплуатации РУ БН-350 предполагается осуществить по варианту (одному из трех, определенных Техническим комитетом МАГАТЭ) «Хранение под контролем» (более точно состояние безопасного хранения отражает американский термин Safe Storage – SAFSTOR).

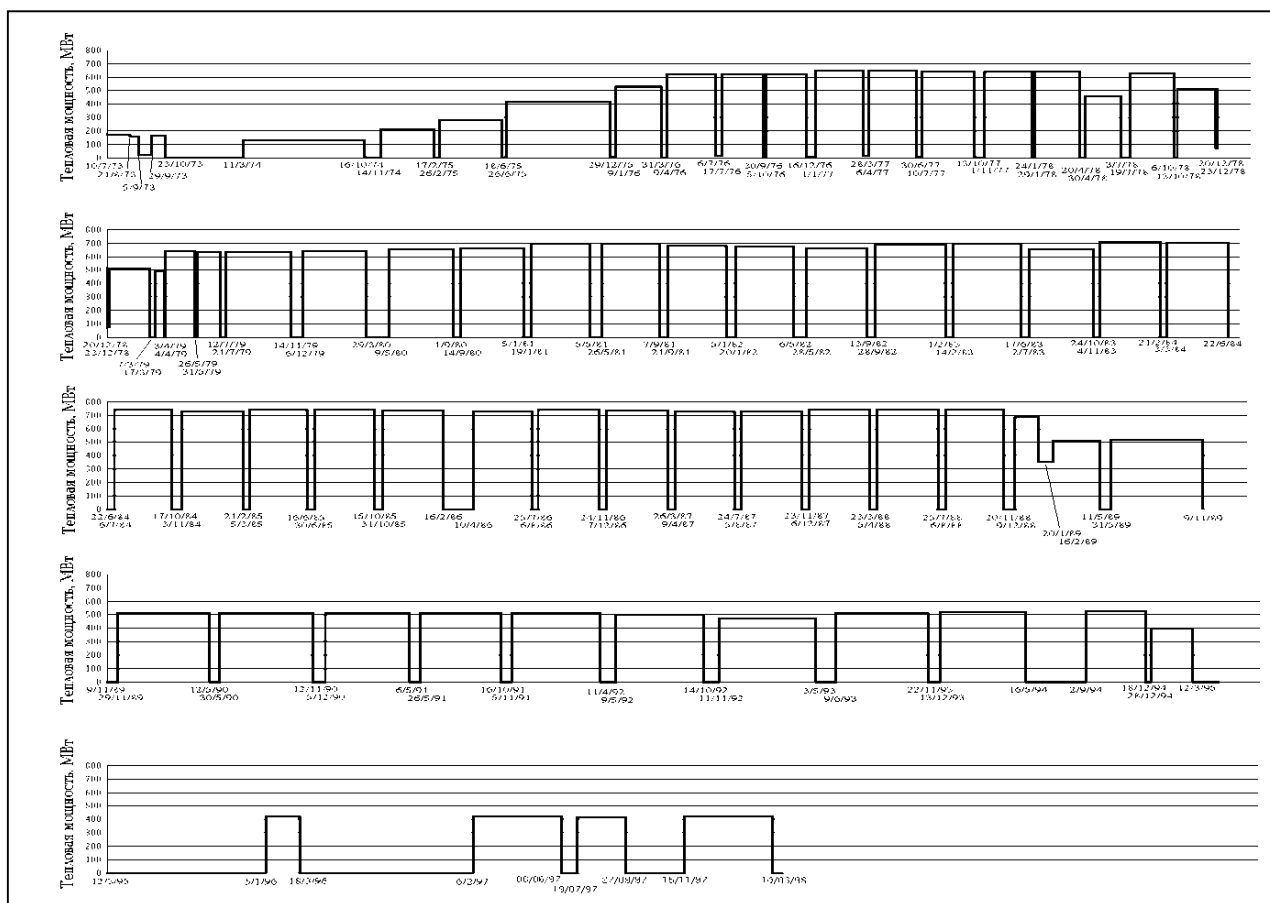


Рис. 1. График несения нагрузки реактором БН-350

Для приведения реактора в состояние безопасного хранения Технический комитет МАГАТЭ рекомендует проведение мероприятий [3]:

- облученное топливо, полностью выгруженное из реактора, в дальнейшем удаляется с реакторной площадки;
- все жидкие теплоносители, легко удаляемые загрязненные радиоактивностью материалы и некоторые сильно загрязненные материалы удаляются;
- первый защитный барьер, например, корпус реактора, остается в том же состоянии, в каком он был в процессе эксплуатации, но все арматурные отверстия (арматура, трубопроводы) закрываются и герметизируются;
- внешняя противоаварийная оболочка сохраняется в нетронутом виде в соответствии с уровнем остающейся в ней радиоактивности;
- атмосфера внутри внешней противоаварийной оболочки (и во всех зонах, содержащих радиоактивность) контролируется, в случае необходимости могут быть введены в действие вентиляционные системы;
- доступ во внутрь противоаварийной оболочки контролируется (ограничивается) физическими барьерами и административными мерами;
- АС находится под постоянным наблюдением, а оборудование для контроля радиоактивного загрязнения как внутри АС, так и в окружающей ее зоне поддерживается в рабочем состоянии и при необходимости используется. Большая часть вентиляционных и вспомо-

гательных систем также поддерживается в рабочем состоянии. Наблюдение осуществляется в соответствии с установленными требованиями;

- проводятся периодические измерения и визуальные проверки в целях гарантии того, что системы, контролирующие радиоактивное загрязнение, то есть вентиляционные системы и защитные барьеры, продолжают функционировать нормально.

На основе рекомендаций МАГАТЭ и с учетом принятой стратегии вывода из эксплуатации РУ БН-350 (в три этапа) сформулированы следующие критерии завершения этапов [4]:

1 этап. Приведение РУ БН-350 в состояние безопасного хранения. Критерии завершения этапа:

- ядерное топливо выгружено из РУ БН-350 и размещено на долговременное хранение;
- жидкометаллический теплоноситель удален из РУ, переработан, радиоактивные продукты переработки помещены на долговременное хранение;
- радиоактивные отходы (РАО) переработаны и помещены на долговременное хранение;
- обеспечен радиационный мониторинг РУ БН-350, санитарно-защитной зоны и зоны наблюдения;
- определен состав систем и оборудования, оставляемых в эксплуатации, демонтируемых и консервируемых;
- выполнены работы по демонтажу и консервации.

2 этап. Безопасное хранение. Критерии завершения этапа:

- истекает 50-летний срок хранения;

– принято решение о начале работ по реализации проекта демонтажа и захоронению отходов.

3 этап. Частичный или полный демонтаж оборудования, зданий, сооружений и захоронение отходов. Критерии завершения этапа:

- выполнен частичный или полный демонтаж оборудования, зданий и сооружений;
- проведены полная дезактивация и реабилитация территории;
- РАО помещены на долговременное хранение или захоронены.

Реакторная установка БН-350 приведена в ядерно-безопасное состояние, все топливо (отработавшее и «свежее») удалено с площадки МАЭК-Казатомпром.

Радиационно-безопасное состояние реактора БН-350 на период безопасного хранения достигается выполнением следующих условий:

- радиоактивный жидкометаллический теплоноситель (натрий и натрий-калий) дренирован из теплообменных контуров и оборудования, переработан и помещен на длительное хранение в качестве радиоактивных отходов;
- все жидкие и твердые РАО переработаны и размещены на длительное хранение;
- системы и оборудование, которые консервируются на штатных местах расположения в качестве защитных барьеров, отмыты от остатков теплоносителя и законсервированы;
- обеспечен радиационный мониторинг реакторного здания и окружающей среды в санитарно-защитной зоне и зоне наблюдения.

Таким образом, выполнение критериев приведения в радиационно-безопасное состояние будет означать приведение реактора в состояние с максимально достижимым (на данном этапе) уровнем радиационной безопасности.

Состояние максимально реально достижимой промышленной безопасности реактора БН-350 на период безопасного хранения достигается при выполнении следующих условий:

- нерадиоактивный жидкометаллический теплоноситель (натрий и натрий-калий) дренирован из теплообменных контуров и оборудования, утилизирован или переработан. Тем самым значительно повышена пожаробезопасность установки;
- системы и оборудование, которые выведены из эксплуатации на момент приведения реактора в состояние безопасного хранения, демонтированы или физически изолированы (обеспечена невозможность ошибочного ввода в эксплуатацию);
- помещения, в которых располагались эти системы, приведены в состояние с максимально достижимым уровнем промышленной безопасности: из помещений удалены горючие и другие опасные материалы, исключена возможность возгорания и затопления, доступ в помещения физически ограничен;
- состояние систем, оборудования, помещений, зданий и сооружений в период безопасного хранения тре-

бует минимального наблюдения и обслуживания с использованием минимального количества активных систем и персонала;

– обеспечена физическая защита зданий и сооружений реакторной установки и хранилища радиоактивных отходов.

Выполнение требований критериев промышленной безопасности будет означать, что безопасность окружающей среды, населения и персонала в состоянии безопасного хранения обеспечена (то есть, выполнены требования критерия высокого уровня). Реализация этих критериев обеспечит возможность эксплуатации и обслуживания систем и оборудования, оставшихся в эксплуатации в период безопасного хранения, а также последующий демонтаж установки.

Организационные и технические мероприятия, направленные на достижение общепромышленной безопасности, целью которых будет достижение данных состояний реакторной установки, должны быть направлены на максимальное снижение уровня опасности в соответствии с принятым в международной практике принципом ALARA (As Low As Reasonably Achievement – так низко, как разумно достижимо).

Достижение ядерно- и радиационно-безопасного состояния, а также состояния промышленной безопасности (в тех рамках, которые описаны выше) является основной целью вывода из эксплуатации реактора БН-350 на этапе приведения реактора в состояние безопасного хранения.

Для перевода РУ БН-350 в состояние безопасного длительного хранения в настоящее время осуществляется комплекс работ, включающий мероприятия:

- 1) по размещению ОЯТ реактора БН-350 на долговременное хранение;
- 2) по обращению с жидкометаллическим теплоносителем;
- 3) по обращению с жидкими радиоактивными отходами РУ БН-350;
- 4) по обращению с твердыми радиоактивными отходами РУ БН-350;
- 5) по подготовке зданий, сооружений и инженерных систем РУ БН-350 к безопасному длительному хранению.

ОСНОВНЫЕ ВЫПОЛНЕННЫЕ РАБОТЫ ПО ВЫВОДУ ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ РУ БН-350

В 1998-2000 гг. на РУ БН-350 выполнена полная выгрузка активной зоны реактора и упаковка отработавших тепловыделяющих сборок (ТВС) в герметичные чехлы.

В 2001-2003 гг. очищено ≈ 600 т натрия первого контура от радионуклидов цезия с применением ловушек-накопителей на основе сетчатого стекловидного углерода (RVC), имеющего высокий коэффициент сорбции и высокое соотношение площади поверхности к объему. Целью данного проекта являлось уменьшение дозовой нагрузки на персонал при предстоящих работах по дренированию натрия, его дальнейшей переработке и выполнении других работ по выводу реактора из эксплуатации.

Система очистки была разработана, установлена и введена в эксплуатацию в рамках международного сотрудничества между США и РК на основании конструкции, которая успешно использовалась в экспериментальном реакторе размножителе EBR-II (США). Перед проведением очистки на реакторном заводе выполнили эксперименты с сорбентом (RVC), которые позволили определить эмпирические зависимости сорбционных свойств RVC от температуры, провести расчет коэффициентов распределения радионуклидов цезия в системе «теплоноситель – сорбент» и выяснить кинетику процесса сорбции [4].

Адсорбция радионуклидов цезия осуществлялась при прокачивании натрия первого контура через ловушки, содержащие дискообразные блоки с пористым стеклоуглеродом (рис. 2). Очищенный натрий возвращался в систему и продолжал циркулировать в петлях первого контура. Устройство очистки размещалось в центральном зале реакторной установки вместо штатного пробоотборника натрия первого контура с тем, чтобы использовать имеющиеся трубопроводы, арматуру и контрольно-измерительные приборы.

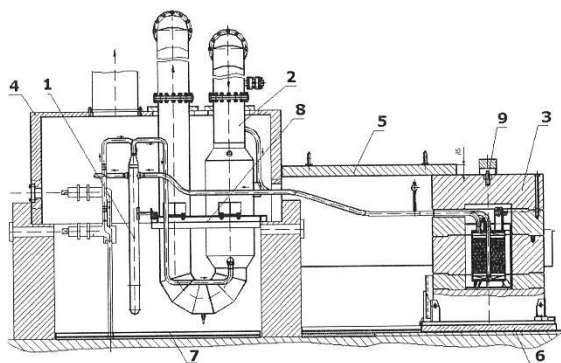


Рис. 2. Схема очистки натрия от цезия: 1 – экономайзер, 2 – натрий-воздушный теплообменник; 3 – цезиевая ловушка в биологической защите; 4 – биологическая защита блока теплообменников; 5 – биологическая защита трубопроводов; 6 – базовая плита; 7 – сборник протечек; 8 – несущая рама; 9 – детектор измерения мощности экспозиционной дозы

В рамках этого проекта было изготовлено семь цезиевых ловушек, содержащих всего около 16 кг стеклоуглеродного сорбента. Каждая ловушка работала до полного насыщения сорбента цезием, после чего она вырезалась и замещалась новой.

Из первого контура было удалено 255 300 ГБк (6900 Ки) ^{137}Cs , что привело к снижению удельной активности цезия в 800 раз до концентрации 0,37 МБк/кг (10 мкКи/кг) и позволило более безопасно дренировать натрий в баки хранения.

Логическим завершением проекта по очистке натрия 1 контура от изотопов цезия явилось кондиционирование ОЛН – приведение ловушек во взрыво- и пожаробезопасное состояние, позволяющее осуществить их долговременное безопасное хранение.

Дренирование жидкометаллического натрия из корпуса реактора и первого контура является одним из важнейших мероприятий при снятии с эксплуатации

реактора БН-350, как необходимый шаг к завершению необратимого останова реактора. Для выполнения этого проекта была разработана технологическая схема с использованием имеющихся технологий и штатных систем, но в корпусе реактора есть места, откуда теплоноситель не может быть дренирован с применением только проектных средств (в нижней части корпуса реактора, в напорных трубопроводах, в кольцевой полости корпуса реактора). Для обеспечения полного дренирования был разработан комплекс мер и проектных решений, например, сверление отверстия во втулке напорного коллектора, расположенной в центральном канале реактора, до размера, необходимого для вывода через него дренажного канала вновь спроектированного устройства (рис. 3) [4].

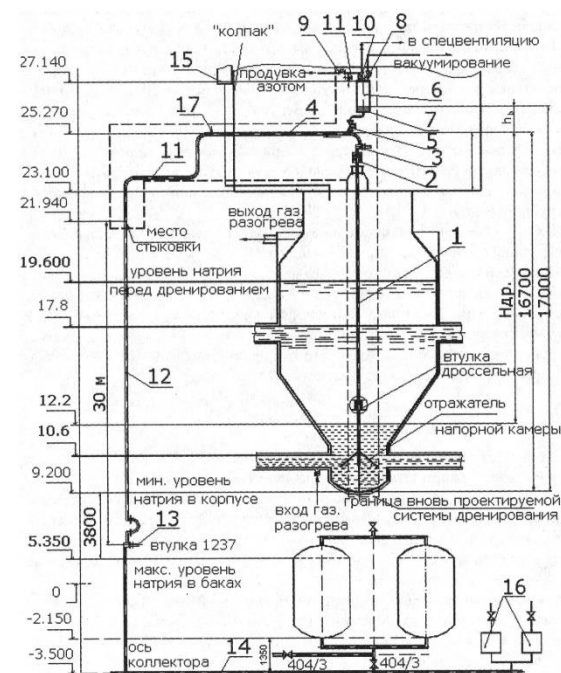


Рис. 3. Схема дренирования натрия через устройство дренирования: 1 – канал дренажный; 2 – расходомер; 3 – вентиль Ду80; 4, 11, 12 – трубопровод Ду80; 5 – вентиль сильфонный; 6 – бак дренажный; 7 – уровнемер; 8, 9, 10 – вентиль Ду25; 13 – вентиль; 14 – дренажный коллектор; 15 – гидрозатвор корпуса реактора; 16 – насосы ПЛИН; 17 – датчик давления

Сверление внутри реактора, заполненного жидким натрием, является чрезвычайно сложной инженерной задачей. Поэтому было решено вначале выполнить сверление на модельной установке, копирующей объект, подлежащий сверлению. Главной задачей модельной установки было выполнение сверления в разных режимах, обеспечивающих безопасность и надежность процесса. По результатам испытаний были определены необходимые технические характеристики, такие как скорость вращения, скорость подачи инструмента, диаметр и материал сверла, последовательность в использовании различных инструментов и т.п.

30 ноября 2003 г. успешно осуществлено дренирование около 610 м³ натрия первого контура в баки системы хранения, в которых натрий в «замороженном» состоянии находится до настоящего времени. Была

проведена уникальная работа по сверлению металлических конструкций внутри реактора на глубине более 13,4 м в натриевой среде с температурой 280-300 °С.

Проведено комплексное радиационно-инженерное обследование зданий и сооружений (КИРО). Получена информация для проведения расчетов образования ТРО и видения текущего состояния оборудования, зданий и сооружений.

Выполнена консервация части оборудования реакторной установки в связи с изменением состояния установки.

Выполнен ремонт облицовки бассейна выдержки отработавшего ядерного топлива способом нанесения защитного полимерного покрытия.

Демонтирован БОП (барабан отработавших пакетов) и переработано его содержимое (3,12 м³ смеси натрия-калия, масла и влаги) методом водомасляной отмывки на специальном стенде – установке водомасляной переработки.

Разработан проект комплекса по переработке жидких радиоактивных отходов.

Для отработки технологии произведены экспериментальные замесы геоцементного камня в 200-литровых бочках (20 бочек), из которых через некоторое время были вырезаны образцы и проведены исследования на механическую прочность и выщелачиваемость.

Завершен монтаж, ведется подготовка к проведению пусконаладочных работ установки по переработке натрия (УПН).

Натрий второго контура дренирован в баки хранения и в последующем разлит в 100-литровые барабаны на установке по разливу натрия 2 контура и отправлен на утилизацию на Ульбинский завод.

Завершено удаление остатков натрия из оборудования и трубопроводов (СУОН).

Закончено проектирование систем по удалению сплава Na-K из оборудования и трубопроводов системы охлаждения холодных фильтр-ловушек.

Для подготовки зданий, сооружений и инженерных систем к безопасному длительному хранению в течение 50 лет закончены строительные-монтажные работы по реконструкции вентиляции здания 130, строительству нового ЗРУ-6кВ.

В 2010 году закончен вывоз отработавшего ядерного топлива с площадки БН-350.

ПЛАНИРУЕМЫЕ РАБОТЫ В РАМКАХ ВЫВОДА РЕАКТОРА ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Для приведения реакторной установки в состояние безопасного длительного хранения необходимо будет провести ряд работ:

- переработку металлического натрия 1 контура в геоцементный камень;
- переработку и кондиционирование жидких радиоактивных отходов ЖРО;
- переработку и кондиционирование твердых радиоактивных отходов ТРО;
- дезактивацию оборудования и трубопроводов первого контура;
- удаление сплава натрия-калий из оборудования и трубопроводов системы охлаждения холодных фильтр-ловушек.
- обращение с холодными фильтр ловушками.
- разработку проекта подготовки зданий, сооружений и инженерных систем РУ БН-350 к безопасному длительному хранению.
- дезактивацию другого загрязнённого оборудования и трубопроводов;
- подготовку инженерных систем и оборудования к безопасному длительному хранению (замена оборудования обеспечивающих систем безопасности, выработавших ресурс);
- реконструкцию очистных сооружений БН-350 с установкой станции биологической очистки;
- демонтаж части оборудования;
- безопасное длительное хранение;
- окончательный демонтаж РУ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Specific Safety Guide SSG-12: Licensing process for nuclear installations/ — Vienna, IAEA, 2010. — P. 80.
2. Атомные электростанции с реакторами на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем: учебное пособие. В 2 ч. Ч. 1 / А.И. Бельтюков, А.И. Карпенко, С.А. Полуяков, О.Л. Ташлыков, Г.П. Титов, А.М. Тучков, С.Е. Щеклеин; под общ. ред. С.Е. Щеклеина, О.Л. Ташлыкова. — Екатеринбург: УрФУ, 2013. — 548 с.
3. IAEA-TECDOC-1476 Financial aspects of decommissioning 2005.
4. Специальные технические условия (СТУ) по выводу реактора из эксплуатации БН-350. КАЭ РК, Алматы, 2000 г.
5. Обращение с натриевым теплоносителем реактора на быстрых нейтронах / И. Таджикибаева, С. Пустобаев, А. Ровнейко и др.: Алматы, НТЦ БЯТ, 2010. 320 с.

УДК 621.039

О. Л. Ташлыков, С. Е. Щеклеин

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина,
г. Екатеринбург, Россия

И. М. Русских, Е. Н. Селезнев, А. В. Козлов

АО «Институт реакторных материалов», г. Заречный Свердловской обл., Россия

РЕАЛИЗАЦИЯ ПРИНЦИПА ОПТИМИЗАЦИИ ПУТЕМ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СОСТАВА ГОМОГЕННЫХ РАДИАЦИОННО-ЗАЩИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ПЛАНИРУЕМЫМ УСЛОВИЯМ ОБЛУЧЕНИЯ

Приведен обзор расчетно-экспериментальных исследований по обоснованию состава гомогенных радиационно-защитных материалов с заданными свойствами, проводимых специалистами Уральского федерального университета и АО «Институт реакторных материалов» в период 2011-2016 гг. Показан потенциал проектирования состава гомогенных защитных материалов при реализации принципа оптимизации радиационной защиты применительно к ситуации планируемого облучения. Представлен алгоритм оптимизации состава гомогенных радиационно-защитных материалов. Приведены методики и результаты расчетно-экспериментальных исследований гомогенных радиационно-защитных материалов типа Абрис с концентрациями барита, свинца, вольфрама от 20 до 90%. Описана технология получения использованных в эксперименте источников гамма-излучения в исследовательском реакторе ИВВ-2М.

Ключевые слова: доза облучения; оптимизация радиационной защиты; гомогенный радиационно-защитный материал; кратность ослабления; метод Монте-Карло; исследовательский ядерный реактор.

O. L. Tashlykov, S. E. Shcheklein

Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

I. M. Russkikh, E. N. Seleznev, A. V. Kozlov

JSC «Institute of Nuclear Materials», Zarechny, Sverdlovsk reg., Russia

IMPLEMENTATION OF OPTIMIZATION PRINCIPLE OF HOMOGENOUS RADIATION-PROTECTIVE MATERIAL CONTENT BY DESIGNING IT IN TERMS OF PLANNED IRRADIATION CONDITIONS

Given is an overview of computational and experimental studies on the justification of composition of homogeneous radiation protective materials with desired properties, conducted by the specialists of Ural Federal University and JSC "Institute of Reactor Materials" in the period of 2011-2016. Showed is the potential of designing the composition of homogeneous protective materials implementing the principle of optimization of radiation protection in relation to the planned exposure situations. The algorithm of optimization of homogeneous radiation-shielding materials is presented. Given are the methods and the results of computational and experimental investigations of homogeneous radiation protective materials, such as Abris with concentrations of barite, lead and tungsten from 20 to 90 %. The technology of production of gamma-ray sources used in the experiment in the research reactor IVV-2M is described.

Key words: radiation dose; radiation protection optimization; homogenous radiation protective material; frequency attenuation; Monte Carlo method; research nuclear reactor.

ВВЕДЕНИЕ

Для снижения дозозатрат при проведении радиационно опасных работ реализуют меры, воздействующие на факторы времени, расстояния, радиационный параметр [1, 2]. Эффективным способом сокращения дозозатрат персонала (до 40 %) за счет воздействия на фактор времени и радиационный параметр, не требующим значительных материальных затрат, является маршрутная оптимизация работ (оптимизация траектории перемещения в нестационарных радиационных полях, последовательности демонтажа элементов радиоактивных систем) [3, 4].

Экранирование источника ионизирующего излучения является одним из основных методов воздействия на радиационный параметр. Использование защитных экранов в настоящее время ограничено небольшим выбором материалов, часто не обладающих удобством использования, что затрудняет их установку и снятие. Для защиты от гамма-излучения, определяющего основную дозовую нагрузку персонала, применяют экраны из материалов с большим атомным номером и высокой плотностью (например, железо, свинец, вольфрам). Среди традиционных защитных материалов наиболее эффективны свинец и вольфрам. Однако их

стоимость значительна. Кроме того, применение листового свинца толщиной более 5 мм требует решения сложных конструктивных задач, что обусловлено его высокой пластичностью. Для надежной фиксации свинцовых листов на вертикальной поверхности требуется большое количество точек крепления, что приводит к созданию «очагов прорыва» защиты, особенно при наличии вибрационных нагрузок [5].

Принцип оптимизации, являющийся одним из основных в обеспечении радиационной безопасности, может быть реализован несколькими путями. Одним из таких направлений является оптимизация состава однородных радиационно-защитных материалов (РЗМ) применительно к планируемым условиям облучения. Возможность реализации принципа оптимизации при проектировании состава однородных РЗМ основывается на зависимости поглощающей способности защитных материалов от энергии гамма-квантов, испускаемых изотопами, входящими в состав радиоактивных загрязнений. В свою очередь, радиоизотопный состав зависит от многих факторов (например, типа реакторной установки, режимов эксплуатации, времени, прошедшего с момента останова реактора) [6].

В реакторных установках типа БН-600 радиоактивность натриевого теплоносителя при работе реактора определяется радионуклидом ^{24}Na , после останова и выдержки порядка 10 суток – изотопами ^{22}Na и ^{137}Cs . Поверхностная загрязненность оборудования первого контура, которая определяется такими изотопами как ^{54}Mn , ^{58}Co , ^{60}Co , ^{137}Cs , является важной характеристикой при проведении ремонтных работ [7].

Изотопный состав радиоактивных загрязнений в контурах реакторных установок с водным теплоносителем примерно одинаков (^{58}Co , ^{60}Co , ^{54}Mn , ^{59}Fe , ^{51}Cr) [1].

При возможности отсрочки выполнения работ на радиоактивных системах (например, демонтаж энергоблоков АЭС, выводимых из эксплуатации), радиационный фон определяется долгоживущими изотопами ^{137}Cs и ^{60}Co . Однако, в условиях эксплуатации, в том числе во время ремонта, модернизации и реконструкции, радиационная обстановка может определяться также изотопами с небольшими периодами полураспада и многообразием спектра гамма-излучения в зависимости от типа реакторной установки, конструктивных особенностей оборудования и т. д.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Необходимым условием создания защиты с заданными поглощающими свойствами является возможность изготовления материала с равномерными распределением материала поглотителя с требуемой концентрацией. Этим требованиям удовлетворяет однородный радиационно-защитный материал (РЗМ) Абрис, разработанный специалистами ООО «Завод герметизирующих материалов».

РЗМ представляет собой однородную композицию на основе полимерного связующего, наполнителя, пластификатора и технологических добавок. Технология производства позволяет получать материал высокого

качества с необходимой концентрацией наполнителей с учетом изотопного состава радиоактивных загрязнений [8].

Для определения кратности ослабления мощности дозы γ -излучения защитным материалом с различными концентрациями поглотителей (барита, свинца, вольфрама) использовались высокоточные расчетные коды, реализующие метод Монте-Карло (определение переноса совокупности нейтронов, фотонов, электронов с непрерывной энергией в обобщенной геометрии и с зависимостью от времени). В задачах переноса частиц приемы Монте-Карло наиболее близки к реальности.

Расчетная модель включает в себя цилиндрический источник γ -излучения, детектор γ -излучения в виде сферы диаметром 20 мм, заполненной материалом, близким по составу к человеческой ткани, и защитный материал в виде квадратной пластины определенной толщины [9].

Для проведения экспериментальных исследований были изготовлены образцы РЗМ с тремя видами поглотителей (баритом, свинцом и вольфрамом) с различной концентрацией (от 20 до 90 %).

Выбор источников γ -излучения для проведения исследований проводился, во-первых, на основании результатов анализа изотопного состава радиоактивных загрязнений на оборудовании и трубопроводах АЭС с реакторами различных типов (ВВЭР-440, ВВЭР-1000, РБМК-1000, БН-600) [1]. Во-вторых, учитывалась возможность получения радиоактивных изотопов на исследовательском ядерном реакторе ИВВ-2М с учетом следующих критериев, определяющих эффективное и безопасное проведение эксперимента:

- наличие в облученном материале источника энергетических линий γ -излучения, соответствующих одному, заранее заданному радионуклиду;
- простота получения на исследовательском ядерном реакторе;
- возможность проведения измерений по определению ослабляющей способности испытываемого радиационно-защитного материала при минимальных дозовых нагрузках на персонал.

Всем этим критериям удовлетворяют нейтронно-активационные детекторы (металлические кобальт ^{59}Co , никель ^{58}Ni , золото ^{197}Au в сплаве с алюминием, железо ^{54}Fe , алюминий ^{27}Al) из аттестованных наборов (АКН-Т-10 №014, СН-60/10, СН-65/11). Эти детекторы применяют в качестве средств измерения плотности потока нейтронов в активной зоне реактора.

Для наработки источников гамма-излучения (^{60}Co , ^{58}Co , ^{198}Au , ^{54}Mn , ^{24}Na) использовался «мокрый» канал исследовательского реактора ИВВ-2М. Конструкция ТВС позволяет устанавливать «мокрый» канал в полость, образованную внутренней чехловой трубой ТВС (рис. 1). Крепление детекторов осуществлялось на специальной державке, изготовленной из алюминиевой трубки $\varnothing 6 \times 1$, которая загружалась в «мокрый канал», представляющий собой алюминиевую трубу $\varnothing 29 \times 1$ длиной 7,5 метров. На рис. 2 изображена схема расположения державки с детектором относительно

центра активной зоны реактора. В табл. 1 приведены характеристики полученных источников.

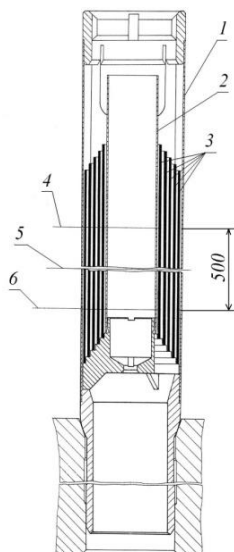


Рис. 1. Вертикальный разрез тепловыделяющей сборки ИВВ-2М: 1 – внешняя чехловая труба; 2 – внутренняя чехловая труба; 3 – тепловыделяющие элементы; 4 – верх активной зоны; 5 – центр активной зоны; 6 – низ активной зоны

Для облучения детекторов использованы две ячейки активной зоны реактора – ячейка 4-7 и центральная ячейка 7-8 (первая цифра обозначает номер ряда, вторая – номер ячейки в этом ряду). Компоновка активной зоны реактора на момент облучения детекторов представлена на рис. 3. Облучение детекторов в реакторе производилось на мощности от 13,7 до 15 МВт.

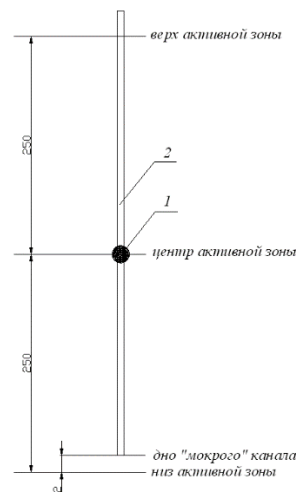


Рис. 2. Положение державки с детектором относительно центра активной зоны ИВВ-2М: 1 – активационный детектор; 2 – державка из алюминиевой трубки

При облучении мишени нейтронным потоком помимо «основной» реакции, в ходе которой нарабатывается нуклид-источник, протекают «мешающие» реакции. Вклад в мощность дозы излучения от нуклидов, являющихся продуктами «мешающих» реакций, необходимо учитывать в процессе использования источника γ -излучения, либо выдерживать источник после облучения для снижения мощности дозы от короткоживущих «мешающих» нуклидов. Пороговые детекторы облучались в кадмиевом экране, вследствие чего отсекались «мешающие» реакции, протекающие на тепловых нейтронах [10].

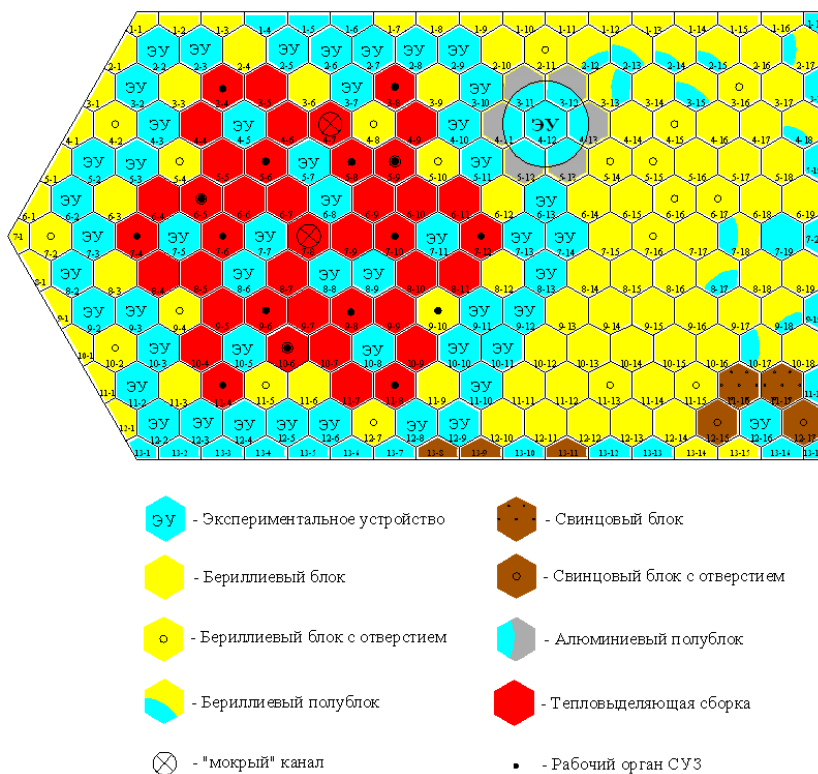


Рис. 3. Картограмма активной зоны

Таблица 1

Характеристики полученных источников γ -излучения

Источник γ -излучения	Время облучения, мин	Активность на конец облучения, Бк	Активность на момент измерения, Бк	Мощность дозы во время измерений на расстоянии 90 мм, мкЗв/ч	
				эксперимент	расчет
^{60}Co	20,0	$3,40 \cdot 10^6$	$3,40 \cdot 10^6$	151	147
^{58}Co	108,0	$6,83 \cdot 10^6$	$6,83 \cdot 10^6$	144	147
^{198}Au	15,0	$3,45 \cdot 10^7$	$1,73 \cdot 10^7$	146	141
^{54}Mn	1680,0	$9,45 \cdot 10^6$	$9,45 \cdot 10^6$	166	168
^{24}Na	60,0	$2,77 \cdot 10^6$	$9,10 \cdot 10^5$	55	56

Для проведения измерений кратности ослабления мощности дозы γ -излучения защитными материалами было изготовлено специальное приспособление [11]. Оно включает в себя: деревянную раму на ножках, к плоскости которой закреплен лист из органического стекла толщиной 3 мм; подставку под измерительный прибор; измерительный прибор. К центру органического стекла крепится источник γ -излучения, а высота подставки под прибор рассчитана таким образом, чтобы ось, проходящая через чувствительный элемент измерительного прибора и источник гамма-излучения, образовывала нормаль к плоскости рамы. Вся конструкция имеет жесткое соединение и исключает самопроизвольное перемещение измерительного прибора относительно источника γ -излучения. Расстояние от чувствительной части измерительного прибора до источника γ -излучения составляет 90 мм.

В качестве измерительного прибора использовался ДКС-АТ1123 («Дозиметр рентгеновского и γ -излучения»). При измерениях мощности дозы приборная ошибка составляла не более 1 %.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты расчетной оценки и проведенных экспериментальных исследований зависимости кратности ослабления мощности дозы γ -излучения от толщины защитного материала марки Абрис с наполнителями барит (содержание барита – 25; 50 и 75 %) и свинец (содержание свинца – 20; 50 и 80 %) приведены на рисунках 4-7.

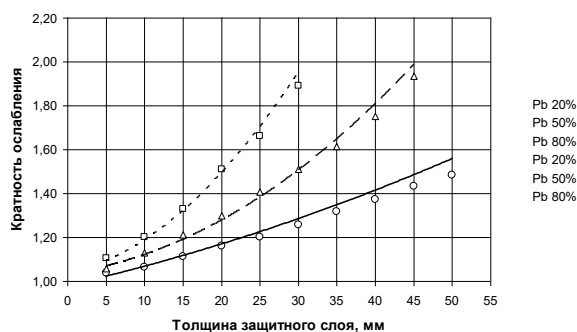


Рис. 4. Расчетные и экспериментальные зависимости кратности ослабления мощности дозы гамма-излучения (источник ^{54}Mn) от толщины слоя защитного материала, содержащего свинцовый наполнитель: ○ – Pb 20% (измер.); Δ – Pb 50% (измер.); □ – Pb 80% (измер.); — – Pb 20% (расч.); --- – Pb 50% (расч.); ··· – Pb 80% (расч.)

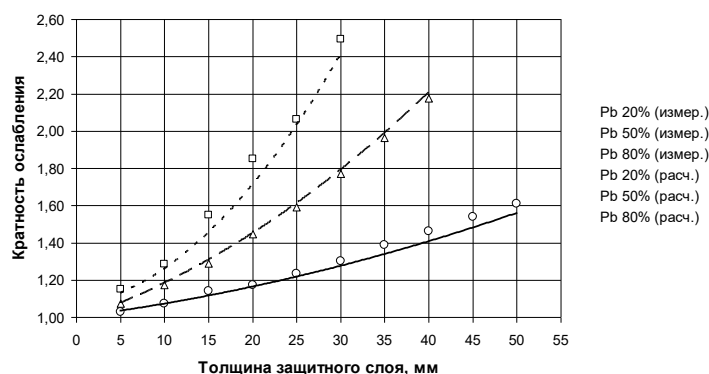


Рис. 5. Расчетные и экспериментальные зависимости кратности ослабления мощности дозы гамма-излучения (источник ^{58}Co) от толщины слоя защитного материала, содержащего свинцовый наполнитель: ○ – Pb 20% (измер.); Δ – Pb 50% (измер.); □ – Pb 80% (измер.); — – Pb 20% (расч.); --- – Pb 50% (расч.); ··· – Pb 80% (расч.)

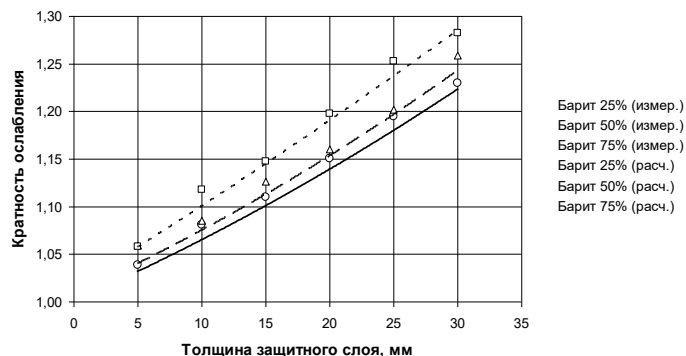


Рис. 6. Расчетные и экспериментальные зависимости кратности ослабления мощности дозы гамма-излучения (источник ^{24}Na) от толщины слоя защитного материала, содержащего баритовый наполнитель: ○ – барит 25% (измер.); Δ – барит 50% (измер.); □ – барит 75% (измер.); — – барит 25% (расч.); --- – барит 50% (расч.); ··· – барит 75% (расч.)

Алгоритм проектирования состава гомогенных РЗМ с заданными ослабляющими свойствами по отношению к гамма-излучению укрупненно может быть представлен в следующем виде [10]. На основании исследования изотопного состава радиоактивных загрязнений в соответствующих элементах АЭС определяется энергетический спектр излучения. Используя данные по пооперационным трудозатратам, производится планирование дозовых затрат персонала. При этом выявляются места рабочей зоны, для которых необходимо

экранирование от излучения. Вводятся требования к характеристикам защитного материала (например, ограничения по толщине). Дополнительно могут возникнуть ограничения по облучаемости специалистов отдельных категорий (например, высококвалифицированных сварщиков, дефектоскопистов), что потребует снижения мощности дозы, не смотря на стоимость защитных мероприятий.

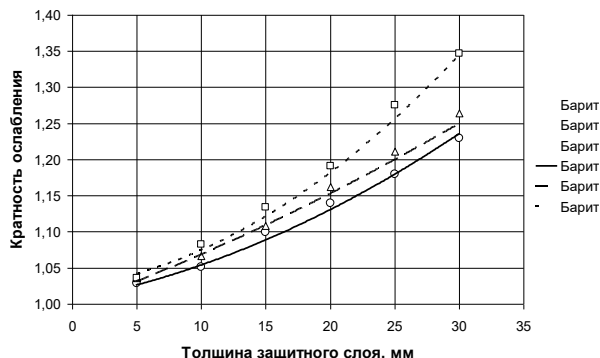


Рис. 7. Расчетные и экспериментальные зависимости кратности ослабления мощности дозы гамма-излучения (источник ^{58}Co) от толщины слоя защитного материала, содержащего баритовый наполнитель: \circ – барит 25% (измер.); Δ – барит 50% (измер.); \square – барит 75% (измер.); — — барит 25% (расч.); - - - барит 50% (расч.); \cdots – барит 75% (расч.)

Используя принцип ALARA, определяется оптимальная концентрация возможных наполнителей и толщина гомогенного защитного материала с использованием одного из методов, применяемых в рамках процедуры ALARA (например, анализа «Затраты-выгода») [1].

В ряде случаев при планировании радиационно опасных работ используется концепция предельно допустимых доз (ПДД). В этом случае на основании необходимой кратности ослабления мощности дозы гамма-излучения в отдельных точках рабочей зоны и ограничений по толщине экранирующего материала производится определение необходимой концентрации возможных наполнителей и сравнение стоимости защитных материалов.

В результате проведения комплекса исследований были получены расчетные зависимости коэффициентов ослабления излучения, создаваемого характерными для различных ситуаций радиоактивными источниками, для различных составов и толщин РЗМ [5]. Эти данные являются исходными для оптимизации защиты.

Химический состав матрицы гомогенного РЗМ Абрис в сочетании с тяжелым наполнителем дает основание прогнозировать возможность использования данного материала для защиты от смешанного нейтронного и γ -излучения при оптимальной концентрации поглотителя, подбираемой расчетным путем для ситуации планируемого облучения. В настоящее время ведутся работы по расчетному обоснованию оптимального состава РЗМ [12].

Особенностью проектирования защиты от нейтронного излучения является необходимость учета генерации (возникновения) вторичного гамма-излучения в результате взаимодействия нейтронов с атомами защитного материала, а также возникновение наведенной гамма-активности в результате активации элементов защитного материала проходящим нейтронным излучением. Поэтому одной из задач проводимых исследований является облучение образцов защитного материала нейтронным потоком в исследовательском реакторе ИВВ-2М для последующего спектрометрического анализа [13].

ВЫВОДЫ

Проводимые расчетно-экспериментальные исследования гомогенных РЗМ с различным составом поглотителей имеет значительный потенциал в практической реализации принципа оптимизации радиационной защиты.

Сравнительный анализ полученных результатов расчетов и измерения коэффициентов ослабления мощности дозы γ -излучения гомогенными защитными материалами марки Абрис РЗ в зависимости от состава и толщины показывает хорошую сходимость результатов.

Технология производства гомогенных РЗМ типа Абрис позволяет формировать требуемые защитные свойства для условий планируемого облучения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ташлыков О.Л. Дозовые затраты персонала в атомной энергетике. Анализ. Пути снижения. Оптимизация: монография. Saarbrücken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. RG. 2011. – 232 с.
2. Наумов А.А., Ташлыков О.Л. Минимизация дозовых затрат при ремонтном обслуживании систем и оборудования АЭС // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. 2010. № 1. – С. 80-88.
3. Балушкин Ф.А., Сесекин А.Н., Ташлыков О.Л., Чеблоков И.Б., Щеклеин С.Е., Ченцов А.Г. Использование метода динамического программирования для оптимизации демонтажа оборудования энергоблоков АЭС, выводимых из эксплуатации, с целью минимизации облучения // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. 2009. № 4. – С. 169-176.
4. Коробкин В.В., Сесекин А.Н., Ташлыков О.Л., Ченцов А.Г. Методы маршрутизации и их приложения в задачах повышения эффективности и безопасности эксплуатации атомных станций. Москва, Новые технологии, 2012.
5. Ташлыков О.Л., Щеклеин С.Е., Лукьяненко В.Ю., Михайлова А.Ф., Русских И.М., Селезнев Е.Н., Козлов А.В. Оптимизация состава радиационной защиты // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. 2015. № 4. – С. 36-42.
6. Ташлыков О.Л. Методы оценки и снижения дозовых нагрузок при ремонте АЭС: учебное пособие. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2009.

7. Ташлыков О.Л., Щеклеин С.Е., Булатов В.И., Шастин А.Г. О проблеме снижения дозовых затрат персонала АЭС // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2011. №1. – С. 55-60.
8. Савченкова Г.А., Артамонова Т.А., Савченков В.П., Ташлыков О.Л., Щеклеин С.Е., Русских И.М., Селезнев Е.Н. Перспективы использования материалов серии Абрис для радиационной защиты персонала АЭС / Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики // Сборник докладов восьмой международной научно-технической конференции 23-25 мая 2012 г. – Москва: ОАО «Концерн Росэнергоатом», 2012. – С. 504-508
9. Русских И.М., Селезнев Е.Н., Ташлыков О.Л., Щеклеин С.Е. Экспериментально-теоретическое исследование органометаллических радиационно-защитных материалов, адаптированных к источникам излучения со сложным изотопным составом // Ядерная физика и инжиниринг. 2014. Т. 5. № 5. – С. 449-455.
10. Ташлыков О.Л., Щеклеин С.Е., Хомяков А.П., Русских И.М., Селезнев Е.Н. Расчетно-эксперименталь-

ное исследование гомогенных защит от гамма-излучения // Ядерная и радиационная безопасность. №3 (77). 2015. – С. 17-24.

11. Ташлыков О.Л., Щеклеин С.Е., Хомяков А.П., Русских И.М., Селезнев Е.Н. Экспериментальное исследование защит от гамма-излучения органо-металлических композиций // Глобальная ядерная безопасность. 2015. № 2 (15). – С. 49-55.

12. Русских И.М., Селезнев Е.Н., Козлов А.В., Ташлыков О.Л., Щеклеин С.Е., Лукьяненко В.Ю., Михайлова А.Ф., Исследование гомогенных защит от нейтронного излучения // XIV Международная конференция «Безопасность АЭС и подготовка кадров»: тезисы докладов. Обнинск: ИАТЭ НИЯУ МИФИ, 2015. – С. 263-266.

13. Козлов А.В., Ташлыков О.Л. Спектрометрические исследования радиационно защитных материалов, облучаемых нейтронами // Труды первой научно-технической конференции молодых ученых Уральского энергетического института. Екатеринбург: ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», 2016. – С. 258-261.

УДК 621.039

Н. Н. Ошканов

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина,
г. Екатеринбург, Россия

САМООБЕСПЕЧЕНИЕ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ ЯДЕРНЫМ ТОПЛИВОМ

Сформулирована проблема обеспечения топливом ядерной энергетики. Рассмотрены параметры, влияющие на планирование ввода быстрых ядерных реакторов.

Ключевые слова: ядерное топливо; реактор на быстрых нейтронах.

N. N. Oshkanov

Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

SELF-PROVISION OF ATOMIC ENERGY WITH NUCLEAR FUEL

Formulated is the problem of fuel provision of nuclear energy. The parameters that influence on the fast breeder reactors commissioning planning are considered.

Key words: nuclear fuel, fast breeder reactor.

В число значимых проблем, препятствующих развитию атомной энергетики, входят низкий уровень использования ресурсов ядерного топлива (порядка 1 %) и отсутствие ясной стратегии обращения с отработавшим ядерным топливом (ОЯТ), тем более что его объемы постоянно растут [1]. Данные проблемы могут быть решены с помощью переработки ОЯТ с направлением извлеченного из него плутония на начальную загрузку быстрых реакторов [2], а недоиспользованного урана и избытка наработанного в быстрых нейтронах плутония, – на изготовление ядерного топлива для тепловых реакторов.

В [3] установлены критерии предельного срока начала ввода быстрых реакторов в зависимости от

располагаемых природных запасов урана. Однако для планирования ввода быстрых реакторов требуется определение соотношения мощностей быстрых и тепловых реакторов, необходимого количества природного урана в переходный период до наступления самообеспечения атомной энергетики ядерным топливом и сроков переходного периода в зависимости от технических характеристик систем АЭС с быстрыми и тепловыми реакторами.

Установлено 8 технических параметров атомной энергетики и ядерного топливного цикла, влияющих на планирование ввода быстрых реакторов. Такое 8-

мерное пространство делает практически невозможным выполнить оптимальный вариант плана.

Выявлено взаимное влияние этих параметров на планирование и выведен обобщающий параметр для планирования ввода быстрых реакторов:

$$D = \frac{\eta_B}{\eta_C} \frac{F_C}{F_B} \frac{(1-C)}{(B-1)} \frac{M_C}{M_B} \quad (1)$$

где η_B , η_C – коэффициенты тепловой эффективности систем АЭС с быстрыми и тепловыми реакторами соответственно; F_B , F_C – коэффициенты использования мощности систем АЭС с быстрыми и тепловыми реакторами соответственно; C – коэффициент конверсии тепловых реакторов; B – коэффициент воспроизводства быстрых реакторов; M_B , M_C – скорости наработки плутония в системах АЭС с быстрыми и тепловыми реакторами соответственно.

Установление обобщенного параметра позволяет снизить 8-мерное пространство до одномерного варианта планирования ввода быстрых реакторов в атомную энергетику.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. GAO-12-79. Accumulation of spent nuclear fuel, Unites States Government Accountability Office, August 15, 2012, pp.1, 53-55.
2. Ран Ф., Адамантиадес А., Кентон Дж., Браун Ч. Справочник по ядерной энерготехнологии / Перевод с англ. Под ред. В. А. Легасова. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 438 с.
3. Ошканов Н.Н., Мальцев В.В. О двухкомпонентной атомной энергетике // Альтернативная энергетика и экология. 2012. №4. – С. 62-63.

УДК 621.039

А. М. Тучков, А. В. Ровнейко

Белоярская АЭС, г. Заречный Свердловской обл., Россия

О. Л. Ташлыков, С. Е. Щеклеин

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия

СИСТЕМА МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА НА АЭС С РЕАКТОРАМИ НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ С НАТРИЕВЫМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ

Сформулированы особенности обеспечения качества при эксплуатации АЭС. Описана система менеджмента качества, функционирующая на Белоярской АЭС. Рассмотрена программа обеспечения качества при вводе в эксплуатацию энергоблока № 4 Белоярской АЭС. Приведен анализ качества работ, выполняемых сторонними организациями, оборудования при сооружении блока с реактором БН-800, обобщен опыт по формированию системы качества на Белоярской АЭС, сформулированы предложения по совершенствованию системы качества.

Ключевые слова: атомная электростанция; реактор на быстрых нейтронах; ядерная безопасность; культура безопасности; обеспечение качества; ввод в эксплуатацию; система менеджмента качества.

A. M. Tuchkov, A. V. Rovneiko

Beloyarskaya NPP, Zarechny, Sverdlovsk reg., Russia

O. L. Tashlykov, S. E. Shcheklein

Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

QUALITY MANAGEMENT SYSTEM FOR NPPS WITH FAST NEUTRON REACTORS WITH SODIUM COOLANT

Formulated are the features of the quality assurance for a NPP exploitation. Described is the quality management system that is operating at Beloyarskaya NPP. Considered is the quality assurance program during the commissioning of unit 4 of Beloyarskaya NPP. Given is the quality analysis of the works performed by third parties and the equipment at the construction of the unit with BN-800. The experience of the quality system formation at Beloyarskaya NPP is summed up. The suggestions of the quality system improvement are made.

Key words: nuclear power plant, fast breeder reactor; nuclear safety; safety culture; quality assurance; commissioning.

ВВЕДЕНИЕ

Перспективная крупномасштабная ядерная энергетика должна обладать гарантированной безопасностью,

экономической устойчивостью и конкурентоспособностью, отсутствием ограничений по сырьевой базе на длительный период времени, экологической устойчи-

востью (малоотходностью). Этим условиям могут удовлетворить ядерные энергетические системы (ЯЭС) с реакторами-размножителями на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем [1].

Россия обладает многолетним опытом в области сооружения и эксплуатации реакторов на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем. Россия имеет значительный научно-технический и проектный задел по быстрым натриевым реакторам, опыт применения их для энерготехнологического использования (опреснение, теплофикация). Энергоблок № 3 Белоярской АЭС (БАЭС) с реактором на быстрых нейтронах БН-600 номинальной электрической мощностью 600 МВт эксплуатируется с 1980 г. Это единственный в мире успешно работающий столь длительное время быстрый реактор промышленного уровня мощности. За этот период освоена и усовершенствована технология безопасного обращения с натрием. Расчётный срок эксплуатации блока был запланирован до 2010 г. На основе накопленного опыта работы, оценки состояния материалов, модернизации и замены отдельного оборудования получена лицензия на его эксплуатацию до 2020 г. с правом последующего продления.

В 2015 г. осуществлен энергетический пуск реактора БН-800, разработанного на базе реактора БН-600 и имеющего улучшенные технико-экономические показатели и характеристики безопасности.

Уникальность реакторов на быстрых нейтронах требует особого подхода к обеспечению безопасности [2]. Категория «безопасность» является одной из характеристик качества. В идеологиях менеджмента качества и культуры безопасности главным ресурсом и капиталом любой организации признается персонал от высшего руководителя до крайнего исполнителя, а методы менеджмента – это методы управления, главным образом, человеческими ресурсами, они начинаются с формирования политики организации и официального заявления о политике организации, формулирования целей и задач персонала и перерастают в формирование корпоративной культуры. Важным условием внедрения системы качества на АЭС является вовлечение в деятельность по обеспечению качества субподрядчиков и поставщиков.

Спецификой этапа эксплуатации является то, что к началу этого этапа оборудование для АЭС уже разработано, изготовлено, поставлено, смонтировано, а АЭС в целом – спроектирована, построена и введена в эксплуатацию в соответствии с нормами, существовавшими на момент начала проектирования. Качество АЭС как объекта может поддерживаться за счет выполняемых на этапе эксплуатации работ, а также качества приобретаемых изделий и материалов, необходимых для выполнения работ (например, при ремонте [3]), что предусмотрено статьёй 35 ФЗ «Об использовании атомной энергии», установившей ответственность и обязанности эксплуатирующей организации за «организацию и координацию разработки и выполнения программ обеспечения качества на всех этапах создания, эксплуатации и вывода из эксплуатации ядерной установки, радиационного источника и пункта хранения».

В докладе приведен анализ качества работ, оборудования при сооружении блока с реактором БН-800, обобщен опыт по формированию системы качества на Белоярской АЭС.

Основные разрешительные документы на сооружение энергоблока № 4: Лицензия на сооружение ядерной установки энергоблока №4 Белоярской АЭС № ГН-02-101-3007 от 26.03.2015 г.

В связи с длительным сроком строительства объекта за период 1994 – 2011 г. произошло изменение требований к сооружаемым АЭС, направленным на повышение безопасности и эксплуатационной надежности. В связи с этим в 2011 г. Государственной корпорацией «Росатом» было принято Решение № БЕЛАЭС-2-81Р(4,6)2011 о корректировке проекта.

В 2012 – 2014 гг. Генеральным проектировщиком АО «Атомпроект» был откорректирован технический проект БН-800.

Откорректированный технический проект БН-800 прошел проверку в ФАУ «Главгосэкспертиза» и получил положительное заключение Государственной экспертизы № 897-15/ГГЭ-8909/02 от 26.06.2015 г.

Обеспечение качества при эксплуатации АЭС имеет свои особенности. Поскольку АЭС относится к ядерно опасным объектам, то для неё обязательными являются законы, нормы и правила, относящиеся к обеспечению ядерной и радиационной безопасности персонала, населения и окружающей среды.

Таблица 1

Перечень обязательных отраслевых функций
(Приложение № 2 и № 5 к приказу Госкорпорации
«Росатом» от 29.12.2012 №1/1321-П)

Внутренний контроль безопасности и качества	Управление качеством
<ul style="list-style-type: none"> - управление (разработка, внедрение и актуализация) регламентирующей и методической документации; - организация и проведение инспекционных проверок (по видам безопасности и качеству продукции, работ и услуг); - контроль за выполнением предписаний ФОИВ и устранением нарушений; - анализ нарушений норм и правил безопасности и требований обеспечения качества, выработка рекомендаций и корректирующих мер; - проверка, анализ и оценка деятельности организаций Госкорпорации и их структурных подразделений. 	<ul style="list-style-type: none"> - управление развитием системы качества; - разработка, актуализация и реализация политики в области качества; - мониторинг, анализ и подготовка отчетности о качестве продукции, работ и услуг; - оценка эффективности системы управления, обеспечения и контроля качества; - обеспечение качества; - контроль качества.

АЭС по своему функциональному назначению выпускает специфический конечный продукт – электроэнергию, которая имеет вполне определённые параметры и не может быть хуже или лучше, т. к. это в равной степени неприемлемо. Побочным продуктом производственной деятельности у АЭС происходит образование различного типа радиоактивных отходов, которые несут потенциальную опасность для окружающей среды и населения. Поэтому наличие таких опасных факторов накладывает на АЭС повышенную ответственность по недопущению неблагоприятного воздействия на окружающую среду и население [4].

Следовательно, речь может идти о качестве функционирования АЭС как объекта, что подразумевает качество структур, процессов, процедур и ресурсов, в том числе людских.

СИСТЕМА МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА БЕЛОЯРСКОЙ АЭС

В 2013-2014 гг. на Белоярской АЭС проведена подготовка к сертификации на соответствие СМК требованиям ГОСТ ISO 9001-2011, НП-090-11 [5] и GS-R-3 [6]. В соответствии с Планом подготовки к сертификации разработаны Политика в области качества, Руководство по качеству, обязательные документированные процедуры и другие внутренние документы, необходимые для обеспечения эффективного планирования, осуществления процессов и управления ими.

Система менеджмента качества Белоярской АЭС создана и функционирует в соответствии с определяющим документом «Руководство по качеству Белоярской АЭС» [7], утвержденным в 2015 году.

Руководство разработано на основании требований межгосударственного стандарта ГОСТ ISO 9001-2011, федеральных норм и правил в области использования атомной энергии НП-090-11 и с учетом руководства по безопасности МАГАТЭ GS-R-3.

Для поддержания СМК в рабочем состоянии и улучшения ее результативности на Белоярской АЭС определены:

- 1) процессы, необходимые для СМК;
- 2) организационная структура;
- 3) комплект документированных процедур;
- 4) ресурсы.

Процессы СМК разделены на три группы: основные, вспомогательные, развития и управления.

Важным элементом описания процессов и их характеристик является выявление опасности и рисков, определение необходимых действий для смягчения негативных последствий, а также установление критериев параметров процессов.

Для каждого процесса разработаны документированные процедуры, в которых приводятся подробное описание процесса (наименование, область применения, вход и выход процесса, цель в области качества, методика мониторинга, критерий результативности процесса, распределение ответственности между подразделениями и руководителями Белоярской АЭС по

управлению и осуществлению процесса). Назначен руководитель процесса. Деятельность различных работников и групп, участвующих в одном процессе, и взаимодействие между ними планируется, контролируется и регулируется таким образом, чтобы была обеспечена эффективная связь и четкое распределение обязанностей.

Разработана схема взаимодействия процессов СМК, процедуры, необходимые для результативного функционирования СМК.

К ресурсам, необходимым для достижения основной цели Белоярской АЭС, относятся: персонал, инфраструктура, производственная сфера, финансы.

На Белоярской АЭС создана структура СМК. Задачи и функции каждого структурного подразделения определены в «Положении об организационной структуре филиала концерна «Росэнергоатом» – Белоярская АС и основных задачах ее структурных подразделений».

Из восьми разделов, содержащихся в руководстве по системе менеджмента качества, рассмотрим раздел 8 «Измерение, анализ и улучшение».

Белоярская АЭС планирует и применяет процессы мониторинга, измерения, анализа и улучшения, необходимые для:

- 1) демонстрации соответствия продукции (методом измерения и контроля параметров вырабатываемой и отпускаемой потребителю электрической энергии, отслеживания выполнения диспетчерских графиков несения нагрузки энергоблоками Белоярской АЭС и отражением этих данных в отчетных документах);
- 2) обеспечения соответствия системы менеджмента качества (методом проведения внутренних проверок (аудитов) в соответствии Положением «Об организации и проведении внутренних аудитов качества на Белоярской АЭС» по утвержденному графику);
- 3) постоянного повышения результативности системы менеджмента качества (методом анализа несоответствий, разработки и выполнения корректирующих и предупреждающих действий, мероприятий по совершенствованию системы менеджмента качества).

Критериями качества функционирования АЭС с точки зрения потребителя являются:

- выполнение установленных показателей по количеству произведенной электроэнергии и мощности;
- выполнение установленных показателей по количеству отпускаемого тепла;
- выполнение диспетчерских графиков несения нагрузки.

Обратная связь с потребителем осуществляется по каналам оперативной связи с СО ЕЭС России через диспетчера Свердловского РДУ в соответствии с документами: «Положение о взаимоотношениях диспетчерского центра Филиала ОАО «СО ЕЭС» Свердловское РДУ и Филиала АО Концерн «Росэнергоатом» «Белоярская АЭС» при осуществлении функций оперативно-диспетчерского управления ЕЭС России и оперативного обслуживания энергообъекта Белоярская АЭС», «Положение о взаимоотношениях между Филиалом ОАО «СО ЕЭС» ОДУ Урала и филиалом

АО «Концерн Росэнергоатом» «Белоярская атомная станция» при осуществлении функций оперативно-диспетчерского управления ЕЭС России и оперативного обслуживания энергообъекта».

Белоярская АЭС проводит внутренние аудиты (проверки) через запланированные интервалы (график внутренних проверок утверждается ежегодно) с целью установления того, что система менеджмента качества:

- 1) соответствует запланированным мероприятиям, требованиям ГОСТ ISO 9001-2011 и требованиям к системе менеджмента качества, разработанным организацией;
- 2) внедрена результативно и поддерживается в рабочем состоянии.

Мониторинг и измерение процессов применяется для демонстрации их способностей достигать поставленных целей (оценки результативности процессов).

Мониторинг и измерение процессов осуществляют владельцы процессов. Методы проведения мониторинга и измерения процессов определены в ДП по соответствующим направлениям деятельности.

Для получения доказательств соответствия фактической нагрузки энергоблоков графику несения нагрузки на Белоярской ЛЭС осуществляется:

- 1) учет электроэнергии, отпущенной в энергосистему, в соответствии с «Инструкцией по учету электроэнергии при ее производстве и распределении на Белоярской АЭС»;
- 2) составление ежемесячного сводного акта первичного учета электроэнергии Белоярской АЭС – филиала ОАО «Концерн Росэнергоатом» за отчетный период.

Несоответствующая продукция для Белоярской АЭС – это нарушения графика несения нагрузки по вине Белоярской АЭС (отказ оборудования, ошибки персонала, недостатки процедур производства работ).

Средства управления, соответствующая ответственность и полномочия для работы с несоответствиями, записи о характере несоответствий и любых последующих предпринятых действиях установлены в ДП «Несоответствия, корректирующие и предупреждающие действия».

Ежегодно новые цели в области качества формулируются и принимаются на первом в текущем году заседании Совета по качеству и вводятся приказом по предприятию. На итоговом заседании Совета по качеству проводится анализ и актуализация политики в области качества. Актуализированная политика вводится приказом по предприятию.

В соответствии с НП-011-99 «Требования к программе обеспечения качества для атомных станций» на Белоярской АЭС проводятся независимые внутренние проверки выполнения ПОКАС (Э), а также проверки (аудиты) выполнения частных программ обеспечения качества, разработанных организациями, выполняющими работы и предоставляющими услуги Белоярской АЭС.

Для обеспечения качества в соответствии с требованиями НП-090-11 СТО 1.1.1.01.0678. ПОКАС (О), правил и норм по безопасности в области использования атомной энергии, а также с учетом рекомендаций МАГАТЭ и положений стандарта ГОСТ ISO 9001 при вводе в эксплуатацию энергоблока № 4 Белоярской АЭС разработана и введена приказом «Программа обеспечения качества при вводе в эксплуатацию энергоблока № 4 Белоярской АЭС» (далее по тексту – ПОКАС (ВЭ)).

ПОКАС (ВЭ) определяет политику эксплуатирующей организации и руководства Белоярской АЭС в области качества, организационно-технические и другие мероприятия по обеспечению качества, направленные на реализацию установленных критериев и принципов обеспечения безопасности при вводе в эксплуатацию энергоблока № 4 Белоярской АЭС. ПОКАС (ВЭ) является частной программой обеспечения качества, действующей при вводе в эксплуатацию энергоблока № 4 Белоярской АЭС. ПОКАС (ВЭ) входит в состав комплекта документов, обосновывающих обеспечение ядерной и радиационной безопасности, предоставляемого в Федеральную службу по экологическому, технологическому и атомному надзору для получения лицензии на вводимый в эксплуатацию после сооружения энергоблок № 4 Белоярской АЭС. Положения ПОКАС (ВЭ) распространяются на системы (элементы), важные для безопасности АС а также на работы и услуги, влияющие на безопасность АС при вводе в эксплуатацию энергоблока № 4 Белоярской АЭС, и являются обязательными для всех предприятий и организаций, принимающих участие в работах по вводу в эксплуатацию энергоблока № 4 Белоярской АЭС. ПОКАС (ВЭ) действует на этапе ввода энергоблока в эксплуатацию, после чего в отношении энергоблока № 4 Белоярской АЭС вступает в действие ПОКАС (Э).

Проведение внутренних и внешних аудитов регламентировано «Положением о проведении внутренних аудитов качества на АЭС», «Положением о проведении проверок (аудитов) выполнения программ обеспечения качества подрядных организаций, выполняющих работы и предоставляющих услуги Белоярской АЭС».

В ноябре 2014 г. Органом по сертификации «Центр сертификации оборудования, изделий и технологий для ядерных установок, радиационных источников и пунктов хранения» (АНО «Атомсертифика») проведен сертификационный аудит СМК Белоярской АЭС.

АНАЛИЗ КАЧЕСТВА ОБОРУДОВАНИЯ, РАБОТ, ВЫПОЛНЯЕМЫХ СТОРОННИМИ ОРГАНИЗАЦИЯМИ ПРИ СООРУЖЕНИИ БЛОКА № 4 С РЕАКТОРОМ БН-800

Как было указано выше, спецификой этапа эксплуатации является то, что к началу этого этапа оборудования для АЭС уже разработано, изготовлено, поставлено, смонтировано, а АЭС в целом – спроектирована, построена и введена в эксплуатацию в соответствии с

нормами, существовавшими на момент начала проектирования. Воздействовать на качество проекта АЭС на этапе эксплуатации весьма сложно.

В соответствии с ФЗ «Об использовании атомной энергии» (статья 37) ответственность за качество выполненных работ и предоставленных услуг, включая «осуществление научных исследований и изысканий, проектирование, сооружение и вывод из эксплуатации ядерных установок, радиационных источников или пунктов хранения, конструирование и изготовление для них оборудования, проведение иных работ и предоставление иных услуг в области использования атомной энергии в течение всего проектного срока службы ядерной установки, радиационного источника, пункта хранения» возложено на организации, выполняющие работы и предоставляющие услуги для эксплуатирующей организации.

На рис. 1 показано распределение событий по категориям оборудования в процессе сооружения энергоблока БН-800, коренными причинами которых являлись недостатки проектирования; изготовления; сооружения; монтажа; документации, выполненной сторонними организациями; наладки; ошибки конструирования.

Из анализа событий по блоку № 4 Белоярской АЭС за 2013-2015 гг. следует, что 70 % от их общего числа (41 из 59 событий) напрямую связаны с недостатками организаций, предоставляющих услуги АЭС. По каждой проблеме было проведено расследование причин событий, разработаны корректирующие и предупреждающие мероприятия.

В качестве примеров можно привести следующие общие проблемы при сооружении БН-800.

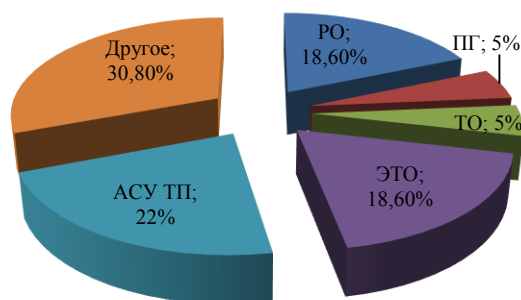


Рис. 1. События по категории оборудования:
РО – реакторное оборудование, ПГ – парогенераторное оборудование, ТО – турбинное оборудование, ЭТО – электротехническое оборудование, АСУ ТП – автоматизированные системы управления тепловыми процессами

Проектно-конструкторские решения

Завышенные требования «АТОМПРОЕКТА» по классификации оборудования. Практически вся вентиляция и арматура имеют класс 3. В связи с этим необоснованное увеличение мощности ДГУ (основная нагрузка ДГУ – вентиляция). Проблемы поиска изготовителей, регистрация оборудования, значительное удорожание стоимости сооружения блока.

Недостатки проектирования биологической защиты. Проектом предусмотрены «прямые» проходки для воздухопроводов систем вентиляции, вспомогательных трубопроводов, кабельных трасс. Недостаточная эффективность защитных дверей помещений первого контура. Потребовалось спроектировать, изготовить и смонтировать более 50 экранов и сооружений дополнительной биологической защиты.

Оптимизация в части строительных конструкций (сокращение площади помещений) привела к дополнительному проектированию кабельных помещений на высотных отметках, по периметру здания и крыши главного корпуса, с необходимостью последующего проектирования СКУ ПЗ, АУГПТ.

Генпроектировщиком не учтен опыт эксплуатации блока № 3. Применяемая на блоке № 4 схема собственных нужд аналогична схемам с блоками ВВЭР. Отсутствуют резервные вводы на секции 6 кВ САЭ и надежного электроснабжения нормальной эксплуатации (на блоке № 3 – имеются).

Проектом сооружения блока № 4 не было предусмотрено сооружение УТЦ с полномасштабным тренажером (ПМТ).

Сооружение УТЦ с ПМТ и техническими средствами обучения осуществляется по отдельному Решению ГК Росатом от 02.08.2010 № I.A.2.1.3.-1. Срок изготовления ПМТ – 2016 год, сооружение здания УТЦ – 2018 год.

С 2014 года для обеспечения практического обучения оперативного персонала применяется аналитический тренажер.

Технологическая часть

Отсутствие инструкций по монтажу, сжатые сроки монтажа и пусконаладочных работ (ПНР). Курирование монтажа осуществлял эксплуатационный персонал, что привело к отсутствию возможности контроля всех монтажных работ в полном объеме. Недостаточное количество персонала «ОКБМ» при шеф-монтаже. «АТОМПРОЕКТ» – занимается только исправлением несоответствий.

Отсутствие специальных устройств и приспособлений для замены и ремонта реакторного и парогенераторного оборудования приведет к невозможности выполнения ремонтных работ и дальнейшей эксплуатации энергоблока.

Импортное оборудование

Применение большого количества сложного и неремонтопригодного импортного оборудования на энергоблоке № 4 в совокупности с отсутствием ЗИП на начальном этапе эксплуатации существенно усложняет оперативное устранение дефектов в процессе энергопуска и опытно-промышленной эксплуатации.

На блоке № 4 в большом количестве применено оборудование импортного производства, ремонт которого не возможен силами специалистов БАЭС, а сроки его

приобретения в случае выхода из строя могут достигать полугода (арматура, двигатели, насосное оборудование).

В схеме выдачи мощности на энергоблоке № 4 применен блочный трансформатор и шунтирующий реактор производства Украины.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты наблюдения за деятельностью и производственной средой, опросы персонала, анализ документов, анализ записей, в том числе обобщенных данных анализа результативности процессов СМК, свидетельствуют о том, что на Белоярской АЭС разработана, внедрена, результативно действует и постоянно улучшается СМК. Действующая СМК в целом соответствует требованиям ГОСТ ISO 9001-2011, НП-090-11, GS-R-3 и обеспечивает выполнение установленных требований.

Для обеспечения качества при вводе в эксплуатацию энергоблока № 4 Белоярской АЭС разработана и введена приказом «Программа обеспечения качества при вводе в эксплуатацию энергоблока № 4 Белоярской АЭС».

Из анализа качества выполнявшихся работ, поставляемого оборудования, предоставляемых услуг сторонними организациями при сооружении блока № 4, можно сделать следующие выводы:

1. До начала сооружения необходимо иметь оформленный проект сооружения энергоблока, одобренный ФАУ «Главгосэкспертиза».
2. Сроки сооружения энергоблоков не должны превышать установленных в проекте.
3. В целях повышения эффективности строящихся энергоблоков, оптимизации организационных и трудовых ресурсов, подготовки и обеспечения строящегося энергоблока эксплуатационным и ремонтным персоналом необходимо иметь единый аппарат управления сооружением.

4. Набор и подготовку эксплуатационного персонала нового энергоблока осуществлять поэтапно, с момента начала сооружения.

5. Необходимо разработать единый «шаблон» согласования работ по вводу всех систем АЭС с назначением ответственного за каждую систему от момента начала ввода до конца.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ташлыков О.Л., Щеклеин С.Е. Экологическое прогнозирование в ядерной энергетике XXI века // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. 2015. № 8-9 (172-173). С. 50-58.
2. Атомные электростанции с реакторами на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем: учебное пособие. В 2 ч. Ч. 2 / А.И. Бельтюков, А.И. Карпенко, С.А. Полуяков, О.Л. Ташлыков, Г.П. Титов, А.М. Тучков, С.Е. Щеклеин; под общ. ред. С.Е. Щеклеина, О.Л. Ташлыкова. – Екатеринбург: УрФУ, 2013. – 420 с.
3. Ташлыков О.Л. Ремонт оборудования атомных станций: Учеб. пособие для вузов / Под ред. С.Е. Щеклеина. Екатеринбург. Издательство УМЦ УПИ. 2003. – 320 с.
4. Новиков Г.А., Ташлыков О.Л., Щеклеин С.Е. Безопасное использование ядерной энергии: правовые аспекты и методы управления, регулирования и обеспечения ядерной и радиационной безопасности: учебное пособие; под общ. ред. Г.А. Новикова. Екатеринбург: УрФУ, 2011. 510 с.
5. Требования к программам обеспечения качества для объектов использования атомной энергии (НП-090-11). М.: Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору, 2013. 10 с.
6. Система управления для установок и деятельности (№ GS-R-3). Вена: МАГАТЭ, 2008. 45 с.
7. Руководство по качеству Белоярской АЭС (Система менеджмента качества Белоярской АЭС). Заречный: Филиал ОАО Концерн Росэнергоатом» Белоярская АЭС, 2015. 52 с.

УДК 621.039

А. Г. Шастин, М. С. Соколова

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина,
г. Екатеринбург, Россия

ИННОВАЦИОННЫЕ СПОСОБЫ ДЕЗАКТИВАЦИИ И КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ РАО

Рассматриваются проблемы по дезактивации и переработке образованных радиоактивных отходов на атомных электростанциях России. Авторы предлагают новый способ, позволяющий совместить процессы дезактивации и кондиционирования радиоактивных отходов.

Ключевые слова: радиоактивные отходы; дезактивация; кондиционирование радиоактивных отходов.

A. G. Shastin, M. S. Sokolova

Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

THE INNOVATIVE METHODS FOR RADIOACTIVE WASTE DECONTAMINATION AND RECYCLING

The problems of decontamination and recycling of radioactive waste formed at nuclear power plants in Russia are considered. The authors propose a new way to combine the processes of decontamination and recycling of radioactive waste.

Key words: radioactive waste; decontamination; radioactive waste recycling.

В существующей практике принято считать, что операции «дезактивация» и «переработка РАО» достаточно самостоятельные и мало зависимые друг от друга. Поэтому при выводе АЭС из эксплуатации проблема снижения затрат на дезактивацию демонтированного оборудования и переработку образовавшихся при этом РАО решается совершенствованием каждого из этих процессов отдельно.

В настоящее время на кафедре «Атомные электростанции и возобновляемые источники энергии» Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина ведутся работы по разработке методов дезактивации отверждаемыми растворами. При этом состав дезактивирующего раствора, а также процессы, которые в нем (растворе) происходят во время дезактивации, влияют на протекание процесса последующего перевода раствора в твердое состояние. Это позволяет значительно упростить технологический процесс от дезактивации до кондиционирования РАО, что в свою очередь дает не только экономическую выгоду, но и позволяет создать целый класс портативного и мобильного оборудования для дезактивации и переработки РАО.

Основой таких дезактивирующих растворов является водная суспензия диатомита с добавлением фосфорной кислоты. Диатомит более чем на 80 % состоит из оксида кремния, который не реагирует с фосфорной кислотой, оксиды других металлов с ней реагируют, образуя фосфатную связку.

По протеканию процесса дезактивации методы можно разделить на четыре группы: контактные, кислотно-абразивные, ультразвуковые и комбинированные (совместное использование ультразвуковых, химических, абразивных и сорбционных эффектов).

Использованный дезактивирующий раствор направляется на отверждение. Способы перевода получаемых после дезактивации жидких радиоактивных отходов в твердое состояние можно разделить на «самоотверждение», низкотемпературную обработку от комнатной температуры до 300-400 °, высокотемпературную обработку (900-1300 °).

По сравнению с традиционными методами дезактивации и переработки радиоактивных отходов применение методов отверждаемых растворов позволяет:

- получать высокостойкую к внешним воздействиям матрицу для кондиционирования РАО, что снижает потенциальную опасность при их длительном хранении;
- сократить количество операций и упростить технологический процесс от дезактивации до кондиционирования РАО, что в свою очередь дает не только экономическую выгоду, но и позволяет создать целый класс портативного и мобильного оборудования для дезактивации и переработки РАО;
- достигать большей удельной концентрации радионуклидов в матрице, что дает сокращение объемов РАО, идущих на захоронение;
- повысить эффективность (коэффициент), а также производительность (скорость) дезактивации в 3-5 и более раз.

В настоящее время на кафедре «АСиВИЭ» ведутся эксперименты и исследования по созданию холодной фосфатной керамики на основе диатомита и фосфорной кислоты с использованием в качестве отвердителя техногенных отходов (металлургических шлаков), а также защиты для транспортировки и хранения РАО.

УДК 621.039

В. П. Ремез, А. А. Иошин

ООО НПП «ЭКСОРБ», г. Екатеринбург, Россия

*О. Л. Ташлыков, С. Е. Щеклеин*Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина,
г. Екатеринбург, Россия*С. Б. Кузнецов*

АО «ВНИИАЭС», г. Москва, Россия

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ СОРБЦИОННОЙ ОЧИСТКИ ЖИДКИХ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ ОТ РАДИОАКТИВНЫХ ИЗОТОПОВ КОБАЛЬТА

Описаны особенности и проблемы удаления кобальта из жидких радиоактивных отходов (ЖРО). Предложена принципиальная схема ионоселективной очистки с использованием сорбентов и фильтр-контейнера COREBRICK™, в которой исключена стадия разрушения органических комплексных соединений радионуклидов. Рассмотрена необходимость и возможность оптимизации (радиационной защиты конденсированных РАО) состава радиационно-защитных материалов фильтр-контейнеров. Представлены результаты экспериментальных исследований по очистке ЖРО от радионуклидов кобальта и цезия с использованием сорбентов, разработанных в НПП «ЭКСОРБ».

Ключевые слова: доза облучения; радиоактивные загрязнения; кобальт-60; цезий-137; дезактивация; жидкие радиоактивные отходы; ионоселективная очистка; сорбционная очистка от нуклидов кобальта и цезия; фильтр-контейнер; оптимизация радиационной защиты.

V. P. Remez, A. A. Ioshin

Scientific Production Enterprise EKSORB Ltd, Ekaterinburg, Russia

O. L. Tashlykov, S. E. Shcheklein

Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

S. B. Kuznetsov

JSC VNIIAES, Moscow, Russia

EXPERIMENTAL STUDY OF SORPTION PURIFICATION EFFICIENCY OF LIQUID RADIOACTIVE WASTE FROM THE RADIOACTIVE ISOTOPES OF COBALT

Described are the features and problems of removal of cobalt from the liquid radioactive waste (LRW). Proposed is a schematic diagram of ion-selective treatment using sorbents and COREBRICK™ filter container, which excludes the stage of destruction of radionuclides organic complex compounds. Considered is the necessity and possibility of optimizing the (condensed radioactive waste radiation protection) composition of radiation-shielding materials filter containers. Given are the results of experimental studies of LRW purification from cobalt and cesium radionuclides with sorbents developed at Scientific Production Enterprise EKSORB Ltd.

Key words: irradiation dose; radioactive pollution; cobalt-60; cesium-137; deactivation; liquid radioactive waste; ion-selective treatment; cobalt and cesium nuclides sorption purification; container filter; radiation protection optimization.

ВВЕДЕНИЕ

Значение дозы облучения зависит от радиационной обстановки в рабочей зоне и времени выполнения работ. Поверхностная загрязненность оборудования первого контура является важной характеристикой при проведении ремонтных работ. Через несколько суток после останова блока на ремонт радиоактивность первого контура водоохлаждаемого реактора в основном определяется радионуклидами коррозионного происхождения: ^{51}Cr , ^{54}Mn , ^{58}Co , ^{59}Fe , ^{60}Co , ^{65}Zn [1]. Кобальт является наиболее радиационно-опасным элементом,

который активируется с образованием изотопа кобальт-60, отличающегося не только высокой энергией гамма-квантов (~1,2 МэВ), но и большим периодом полураспада ($T_{1/2} = 5,272$ года).

Образование радиоактивного изотопа ^{60}Co из ^{59}Co происходит в ядерном реакторе под действием нейтронного излучения. Содержание ^{59}Co в хромоникелевых нержавеющих сталях типа 18-10 составляет около 0,1 %. Кобальт, как трудно удаляемая примесь к никелю, всегда содержится в рудах, и при любых метал-

лургических процессах переработки попадает в никелевую сталь. Активность ^{60}Co после начала эксплуатации АЭС постоянно растет и достигает равновесного значения примерно через 30 лет. На практике при длительной работе реактора активность ^{60}Co составляет не менее 90 % общей активности отложений [2]. Имея большой период полураспада, ^{60}Co совместно с изотопом ^{137}Cs определяют радиационный фон при демонстрации выводимых из эксплуатации энергоблоков АЭС после окончательного останова и длительной выдержки.

Среди мероприятий, снижающих дозовые нагрузки персонала при проведении ремонтных работ [3], обязательным является дезактивация радиоактивного оборудования и систем. Радиационная обстановка в рабочей зоне при этом улучшается за счет перераспределения радионуклидов, включая кобальт, с поверхности контура в дезактивирующие растворы и далее в жидкие радиоактивные отходы (ЖРО).

ЖРО АЭС в виде кубовых остатков представляют собой солевые растворы высокой концентрации, загрязненные продуктами деления, радионуклидами коррозионного происхождения, различными веществами, используемыми для поддержания водно-химического режима и дезактивации оборудования.

Единый подход, выработанный в мировой практике обращения с радиоактивными отходами (РАО), сводится к кондиционированию и окончательной изоляции РАО от биосферы. ЖРО для сокращения их объема перерабатывают выпариванием (концентрирование), удалением радионуклидов (селективная очистка).

При цементировании, битумировании, упаривании и ионоселективной сорбции объем ЖРО сокращается соответственно в 0,9-1,3; 1,5-2,5; 2-3; 70-90 раз [4]. Высокие возможности селективной сорбции позволяют сконцентрировать радионуклиды ЖРО в малом объеме сорбента.

Радиоактивные вещества в растворах кубовых остатков находятся в виде простых и комплексных ионов, нейтральных молекул и коллоидных частиц. Основными радионуклидами в кубовых остатках являются ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{60}Co , ^{54}Mn . Для изотопов цезия характерна ионная форма нахождения. Радионуклиды Co и Mn в кубовых остатках находятся в форме комплексов с соединениями, используемыми для дезактивации оборудования (щавелевая, муравьиная, лимонная и этилендиаминтетрауксусная (ЭДТА) кислоты).

Нахождение кобальта и марганца в комплексной, а потому в несорбируемой форме, определяет необходимость разрушения комплексов для решения проблемы выделения этих радионуклидов из растворов. Кроме того, органические соединения, присутствующие в кубовом остатке, снижают ресурс ферроцианидных сорбентов цезия.

Кубовые остатки АЭС имеют водородный показатель pH от 8 до 13. Для разрушения комплексных соединений радионуклидов в таких средах предложен ряд спо-

собов (например, перманганатное окисление, озонирование, электрохимическое окисление), из которых в производственных условиях реализовано озонирование. Озонирование разрушает с достаточно высокой скоростью практически любые органические соединения, в том числе и комплексообразующие.

Ионоселективная очистка является единственной реализованной в настоящее время технологией, позволяющей очищать кубовый остаток (ЖРО) до требований НРБ. Основными технологическими стадиями процесса очистки ЖРО на установке ионоселективной очистки являются предварительная фильтрация и подготовка исходного раствора, озонирование, фильтрация и селективная сорбция. После озонирования и фильтрации очищаемый раствор направляют на селективную сорбцию цезия на ферроцианидных сорбентах в двух последовательно соединенных фильтрах-контейнерах (ФК). Конечными продуктами переработки являются: очищенный от радионуклидов солевой раствор; отработавший сорбент в фильтрах-контейнерах (объемная активность в сотни раз выше, чем у исходного ЖРО); шлам с фильтров, образующийся в результате озонирования (объемная активность находится на уровне исходных ЖРО) [4].

Для данной технологии имеется ряд ограничений, связанных с озонированием для разрушения органических комплексов коррозионных радионуклидов, главным образом кобальта-60. Наиболее прочные комплексы кобальт образует с ЭДТА, что препятствует осаждению или сорбции радионуклидов кобальта из растворов и мешает дезактивации ЖРО. Для такого комплекса скорость озонолиза в 10^4 раз меньше по сравнению со свободными молекулами ЭДТА. Это приводит к перерасходу озона и делает озонолиз не всегда эффективным. В результате, на АЭС имеются емкости с неозонируемыми ЖРО.

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА

Специалистами НПП «ЭКСОРБ» разработана технология COREBRICK™, позволяющая проводить кондиционирование ЖРО и хранить отвержденные отходы с соблюдением требований безопасности для окружающей среды. В основе технологии лежит двухстадийная сорбция с применением уникальных сорбентов, разработанных в НПП «ЭКСОРБ» [5].

Высокие сорбционные свойства сорбентов позволяют обойтись без предварительной фильтрации растворов и разложения в них органических загрязнений, что позволяет удалить основную часть радионуклидов из раствора в шлам, сокращая количество фильтр-контейнеров на замыкающей стадии.

Основными этапами процесса ионоселективной очистки с использованием сорбентов НПП «Эксорб» являются: раскочка ЖРО; добавление мелкодисперсного сорбента; перемешивание в течение 1-2 часов (сорбция в статическом режиме); отделение шлама с отработанным сорбентом; сорбция в динамическом режиме с использованием фильтр-контейнера с сорбентом. При этом исключается стадия озонирования, не требуется нагревание ЖРО.

На стадии статической сорбции из ЖРО удаляется до 95 % активности, оставшиеся 5 % активности извлекаются в динамическом режиме либо на 2-й стадии статической сорбции.

Фильтр-контейнер COREBRICK™ состоит из бетонного блока, подающего и отводящего патрубков и съемной мешалки. Ядром контейнера является колонна, наполненная сорбентом. После кондиционирования сорбент перемешивается с цементным раствором для получения компаунда и закрывается бетонной крышкой. Контейнер COREBRICK™ может быть использован для безопасного хранения на АЭС или передан на постоянное хранение.

Высокая эффективность неорганических сорбентов нового поколения открывает широкие возможности для повышения эффективности работы установок ионоселективной сорбции, при условии решения задачи безопасного хранения отработанного сорбента средней и высокой активности в местах переработки, транспортировки и захоронения.

Важным условием реализации данной технологии является оптимизация радиационной защиты фильтр-контейнера. С 2014 г. специалистами кафедры «Атомные станции и ВИЭ» УрФУ совместно с НПП «Эксорб» ведутся работы по анализу радиационно-защитных материалов (РЗМ) с целью определения эффективного состава для изготовления фильтр-контейнеров, обеспечивающих иммобилизацию кондиционированных РАО. Эффективность РЗМ имеет значительный потенциал в реализации принципа оптимизации радиационной защиты, являющегося одним из основных в обеспечении радиационной безопасности. В настоящее время разработан алгоритм оптимизации состава РЗМ, позволяющий реализовать принцип ALARA (As Low As Reasonably Achievable – настолько низко, насколько разумно достижимо) [6, 7], проведены оценочные расчеты оптимального состава РЗМ фильтр-контейнеров применительно к очистке ЖРО от цезия-137. Для верификации результатов расчетного определения защитных свойств РЗМ были проведены экспериментальные исследования с использованием характерных источников γ -излучения, полученных в исследовательском ядерном реакторе ИВВ-2М [8].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

Экспериментальные исследования возможности применения сорбентов производства ООО НПП «Эксорб» для очистки ЖРО от радионуклидов цезия и кобальта без предварительного озонирования проводились в лабораторных условиях на реальных ЖРО Кольской АЭС [9].

В качестве объектов испытаний использовались пробы ЖРО различных характеристик ($pH_{исх}$ от 8,3 до 12), включая не поддающиеся озонированию концентрированные растворы (D), удовлетворительно озонируемые растворы после озонирования (F) и использования одной или двух стадий фильтрации, а также смешанные растворы после озонирования и использования одной или двух стадий фильтрации.

Для измерения активности использовался гамма-спектрометрический комплекс CANBERRA LabSOCS на основе германиевого детектора GC3018 № 12059035.

В емкость с ЖРО объемом 0,5 дм³ добавляли от 0,5 до 1 % сорбентов по массе в виде порошков или паст (влажность 70-80 %), перемешивали на магнитной мешалке в течение от 30 минут до 2 часов, отдельные пробы после перемешивания оставляли для отстаивания в течение 12 часов (табл. 1). Отбор проб для радиометрирования проводили из осветленной части с фильтрованием сначала через бумажный фильтр «синяя» лента, затем через бумажный фильтр «зеленая» лента.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В табл. 1 и на рис. 1 и 2 приведены данные по 6 из 35 экспериментов при испытании технологии ионоселективной очистки COREBRICK с использованием различных сочетаний сорбентов на реальных ЖРО, приведенных в период с 31.05.2016 по 03.06.2016 гг. в филиале АО «Концерн Росэнергоатом» «Кольская атомная станция». Индексом «0» обозначена соответствующая исходная проба. Обозначение «н/о» (не обнаружено) приведено в случаях, когда погрешность определения активности очищенного раствора превышала результат измерения.

Таблица 1

Характеристики эксперимента			
№ эксперимента	Исходный раствор	Примененные сорбенты	Время перемешивания, ч
3	D	СМЕТ _(г) + H ₂ O ₂ + НИКЕТ	2
4		СМЕТ _(г) + H ₂ O ₂ + НИКЕТ (паста)	2
25		УНИКЕТ	2
20	F	НИКЕТ + НИКЕТ (паста)	1
28		НИКЕТ + НИКЕТ (паста) + СМЕТ	2
30		УНИКЕТ + НИКЕТ (паста) + СМЕТ	2

Как показывают результаты экспериментов по очистке с помощью сорбентов реальных ЖРО в статическом режиме, снижение активности изотопов кробальта-60 в пробах неозонированного раствора ЖРО достигает 10³.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные в результате экспериментов на реальных ЖРО Кольской АЭС в лабораторных условиях данные подтверждают возможность применения сорбентов производства ООО НПП «Эксорб» для очистки ЖРО от радионуклидов цезия, кобальта без предварительного озонирования. При исключении стадии озонирования работа установки ионоселективной очистки ЖРО значительно упрощается, повышается её производительность, надежность и безопасность.

Технология COREBRICK позволяет создавать мобильные установки переработки ЖРО для оказания сервиса по кондиционированию ЖРО на объектах атомной энергетики. Проектирование состава РЗМ

фильтр-контейнеров имеет значительный потенциал в реализации принципа оптимизации радиационной защиты и повышении эффективности данной технологии.

Для уточнения способов предварительной подготовки

(в том числе окисления/восстановления) ЖРО, изучения технологии сорбции в динамических условиях (фильтрации через слой сорбента), разработки материального баланса сред в условиях применения сорбента требуется выполнение дальнейших научно-исследовательских работ по применению сорбентов.

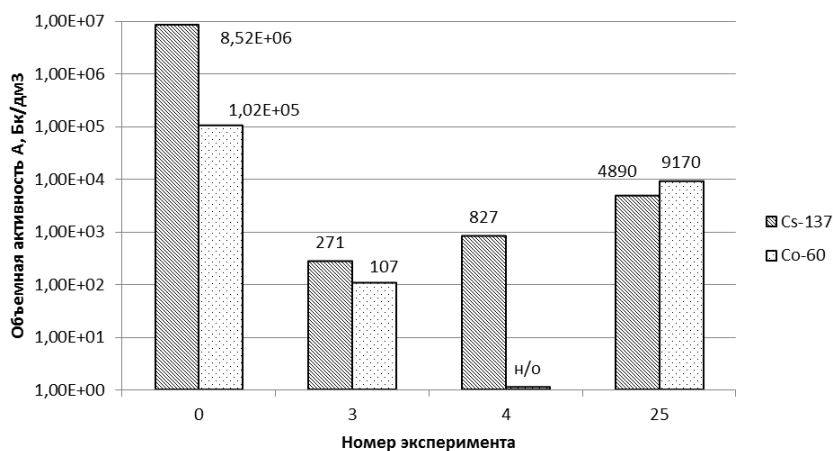


Рис. 1. Изменение активности цезия-137 и кобальта-60 в пробе D (0) после очистки сорбентами

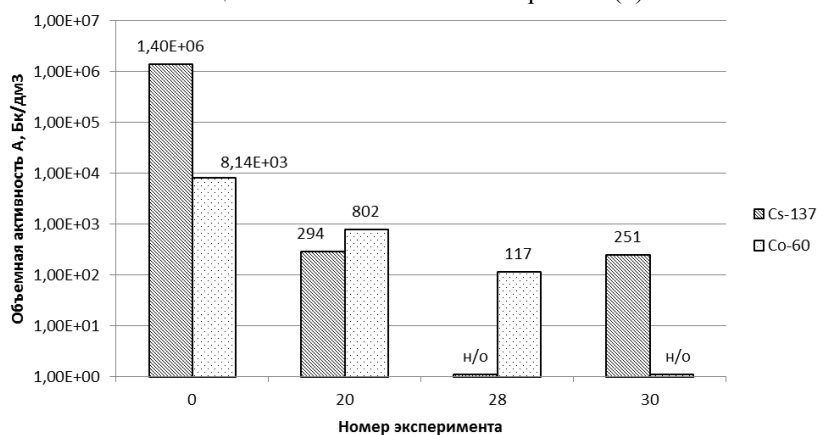


Рис. 2. Изменение активности цезия-137 и кобальта-60 в пробе F (0) после очистки сорбентами

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ташлыков О. Л. Дозовые затраты персонала в атомной энергетике. Анализ. Пути снижения. Оптимизация: монография. Saarbrücken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. RG. 2011. – 232 с.
2. Ампелогова Н. И., Симановский Ю. М., Трапезников А. А. Дезактивация в ядерной энергетике. – М.: Энергоиздат, 1982. – 256 с.
3. Наумов А. А., Ташлыков О. Л. Минимизация дозовых затрат при ремонтном обслуживании систем и оборудования АЭС // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. 2010. № 1. – С. 80-88.
4. Метод ионоселективной очистки жидких радиоактивных отходов атомных станций / Арустамов А. Э., Савкин А. Е., Зинин А. В., Красников П. В., Прилепо Ю. П., Перевезенцев В. В., Свитцов А. А., Хубецов С. Б., // Безопасность жизнедеятельности. №11. 2005. С. 13-16.
5. Кузнецов С. Б., Рыжкова В. Н., Ремез В. П., Воинов И. В. Повышение эффективности работы установки УИСО / Десятая международная научно-техническая конференция «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики». Москва. 25-27 мая 2016 г. Тезисы докладов. М., АО «Росэнергоатом», 2016. – С. 110-111.
6. Оптимизация состава радиационной защиты / Ташлыков О. Л., Щеклеин С. Е., Лукьяненко В. Ю., Михайлова А. Ф., Русских И. М., Селезнев Е. Н., Козлов А. В. // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. 2015. № 4. – С. 36-42.
7. Ташлыков О. Л., Щеклеин С. Е., Хомяков А. П., Русских И. М., Селезнев Е. Н. Расчетно-экспериментальное исследование гомогенных защит от гамма-излучения // Ядерная и радиационная безопасность. №3 (77). 2015. – С.17-24.
8. Русских И. М., Селезнев Е. Н., Ташлыков О. Л., Щеклеин С. Е. Экспериментально-теоретическое исследование органометаллических радиационно-защитных материалов, адаптированных к источникам излучения со сложным изотопным составом // Ядерная физика и инжиниринг, 2014, том 5, №5. – С. 449-455.
9. Испытания ионоселективной очистки ЖРО по технологии COREBRICK с использованием сорбентов производства ООО НПП «Эксорб» на ЖРО филиала АО «Концерн Росэнергоатом» «Кольская атомная станция». 31 мая – 3 июня 2016 г. Технический отчет: Полярные Зори. 2016. – 9 с.

Секция 3

Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии



УДК 517.977.56; 502.174.3

К. С. Денисов, Л. Р. Хайретдинова, В. И. Велькин

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина,
г. Екатеринбург, Россия

АНАЛИЗ КОМПЬЮТЕРНЫХ ПРОГРАММ ПО ВЫБОРУ ОБОРУДОВАНИЯ СИСТЕМЫ ВИЭ

В данной работе рассмотрены основные программные комплексы по расчету оптимального состава оборудования возобновляемой энергетики. Приведено сравнение различных компьютерных программ. Произведен анализ преимуществ и недостатков каждой из них.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии; компьютерная программа; комплексная система.

K. S. Denisov, L. R. Khairatdinova, V. I. Velkin

Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

THE ANALYSIS OF COMPUTER PROGRAMS FOR ALTERNATIVE ENERGY SOURCES EQUIPMENT SELECTION

In this paper, the main software packages for calculating the optimal composition of the renewable energy equipment are considered. The comparison of various computer programs is given. The analysis of the advantages and disadvantages of each of them is made.

Key words: renewable energy sources; computer program; integrated system.

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день около 30 % населения и более 70% территории России не имеет централизованного энергоснабжения. Вопрос энергоснабжения в таких районах решают с помощью дизель-генераторов. Но обслуживание дизельных электростанций обходится дорого, поэтому необходимо искать альтернативный вариант энергоснабжения. Возникшую проблему можно решить, применяя установки возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Широкое внедрение установок чистой энергии затрудняет ряд проблем. Основной проблемой при применении установок ВИЭ является стохастичность таких источников энергии, как солнечное излучение, ветер, приливы, сток малых рек, тепло окружающей среды. Непостоянство характеристик ветра, солнца или волн зачастую требует правильного расчета и подбора оборудования. Для повышения эффективности комплексных систем ВИЭ необходимо знать оптимальный состав основного и вспомогательного оборудования. Наиболее рациональным способом для нахождения эффективного комплекса установок возобновляемой энергетики является использование электронно-вычислительных машин.

В настоящее время разработано множество компьютерных программ по расчету и подбору энергосистем на базе ВИЭ. При этом каждая из этих программ имеет свои преимущества и недостатки.

В данной статье рассмотрены зарубежные и российские программные комплексы, позволяющие учесть основной недостаток большинства программ, а именно невозможность рассчитать комплексную си-

стему, состоящую из нескольких видов возобновляемых источников энергии: Homer, АРК-ВИЭ и VizPRORES.

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС HOMER

Комплекс оптимизации энергосистем HOMER – компьютерная программа, разработанная американской Национальной Лабораторией возобновляемых источников энергии (NREL), предназначена для расчета энергосистем малой мощности и облегчения сравнения различных способов выработки энергии. HOMER позволяет сравнить много различных вариантов энергоснабжения, основываясь на технико-экономической целесообразности.

Такая энергосистема может использовать любую комбинацию установок возобновляемых источников энергии и может быть подключена либо к сети, либо работать автономно, то есть не иметь присоединения к сети. Примерами таких систем являются фотоэлектрические преобразователи; ветро-дизельная система, обслуживающая изолированную деревню (рис. 1). Данное программное обеспечение может моделировать как автономную, так и соединенную с сетью энергосистему, производящую тепловую и электрическую энергию, и содержащую любую комбинацию источников энергии.

Программный комплекс HOMER позволяет выбирать до 10 компонентов. Три из них вырабатывают электроэнергию от возобновляемых источников энергии. К этой группе относятся фотоэлектрические преобразователи, ветроэнергетические установки (ВЭУ) и гидротурбины. HOMER может рассчитывать только русловую гидроэнергетическую установку.

Еще три компонента программного обеспечения – дизель-генератор, сеть и котел. Дизель-генератор – это устройство, которое потребляет топливо и вырабатывает электроэнергию, также можно получить тепловую энергию путем утилизации тепла двигателя. Централизованная сеть обеспечивает энергией подключенных к ней потребителей, а также может принимать излишки электроэнергии из комплексных систем ВИЭ. HOMER включает в расчет инвертор и топливные элементы, которые превращают электроэнергию в другие формы энергии. Рассмотрим, как компьютерная программа HOMER рассчитывает каждый компонент.

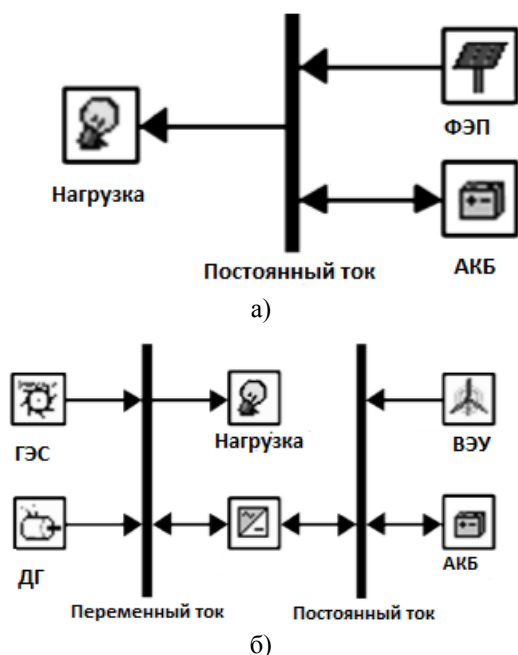


Рис. 1. Принципиальные схемы некоторых микро-энергосистем: а) фотоэлектрическая система; б) гибридная гидро-ветро-дизельная система

Фотоэлектрический преобразователь (ФЭП)

Принцип работы фотоэлектрических преобразователей заключается в производстве электроэнергии при попадании солнечного излучения на панель. Эффективность работы солнечных панелей прямо зависит от интенсивности солнечного излучения. HOMER для вычисления выходной мощности солнечной батареи применяет формулу:

$$P_{PV} = f_{PV} \cdot Y_{PV} \cdot \frac{I_T}{I_S}, \quad (1)$$

где f_{PV} – коэффициент снижения номинальной мощности; Y_{PV} – номинальная мощность ФЭП, кВт; I_T – дневной приход суммарной (диффузионной и прямой) солнечной радиации на поверхность, кВт/м²; I_S – поток солнечной радиации для определения номинальной мощности ФЭП при 25 °C (1 кВт/м²).

Коэффициент снижения номинальной мощности предназначен для учета воздействия на панель пыли, потерь в проводе, повышенной температуры и т. п. Программа HOMER при расчетах ФЭП предполагает, что в системе имеется контроллер с алгоритмом поиска точки максимальной мощности (ТММ). Принцип ра-

боты этого устройства основан на управлении максимальными энергетическими пиками. ТММ-контроллер постоянно отслеживает ток и напряжение на ФЭП, перемножает их значения и определяет пару ток-напряжение, при которых мощность солнечных панелей будет максимальной.

Ветроэнергетическая установка (ВЭУ)

Ветрогенератор – устройство для преобразования кинетической энергии ветрового потока в механическую энергию вращения ротора с последующим её преобразованием в электрическую энергию в соответствии с кривой, представляющей собой зависимость выходной мощности ВЭУ от скорости ветра (пример приведен на рис. 2).

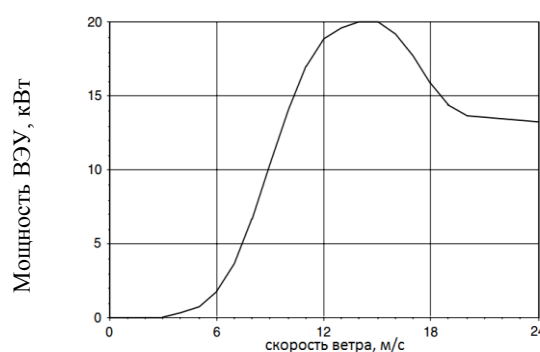


Рис. 2. Зависимость мощности ВЭУ от скорости ветра

При расчете HOMER предполагает, что кривая мощности строится при плотности воздуха 1,225 кг/м³. Для каждого часа работы программный комплекс вычисляет выходную мощность в четыре этапа. Во-первых, HOMER определяет среднюю скорость ветра за час. Во-вторых, с помощью логарифмической зависимости вычисляет среднюю скорость ветра на высоте турбины. В-третьих, программа, используя кривую мощности ВЭУ, рассчитывает выходную мощность в зависимости от скорости ветра. В-четвертых, HOMER находит произведение выходной мощности и плотности воздуха.

Гидроэлектростанция (ГЭС)

Для определения выходной мощности ГЭС программный комплекс HOMER рассчитывает эффективный напор потока воды, используя уравнение:

$$h_{эфф} = h \cdot (1 - f_h) \quad (2)$$

где h – напор потока воды; f_h – потери напора потока воды в трубах.

Также пользователь должен ввести допустимый диапазон скоростей для турбины. Вычисление расхода потока струи через турбину производится по следующему уравнению:

$$Q_{турб} = \begin{cases} \min(\Delta Q), w_{max} Q_{ном} & \Delta Q \geq w_{min} Q_{ном} \\ 0 & \Delta Q \leq w_{min} Q_{ном} \end{cases} \quad (3)$$

где $\Delta Q = Q_{поток} - Q_{потери}$, $Q_{поток}$ – расход потока воды; $Q_{потери}$ – расход на фильтрацию, испарение и санитар-

ный водосброс; w_{max} и w_{min} — максимальный и минимальный коэффициенты расхода потока; $Q_{ном}$ — номинальный расход турбины.

Как видно из уравнения, турбина не работает, если расход потока ниже минимального, а скорость потока не может превышать максимальное допустимое значение.

Выходная мощность гидроэлектростанции:

$$P_{ГЭС} = \eta_{ГЭС} \cdot \rho_{воды} \cdot h_{эфф} \cdot g \cdot Q_{турб} \quad (4)$$

где $\eta_{ГЭС}$ — коэффициент полезного действия ГЭС; $\rho_{воды}$ — плотность воды; g — ускорение свободного падения.

Аккумуляторные батареи (АКБ)

При расчете HOMER предполагает, что химические свойства батарей остаются неизменными на всем протяжении срока службы, то есть не зависят от внешних факторов. В программу необходимо ввести основные физические свойства аккумулятора: номинальное напряжение, зависимость мощности от тока разряда, зависимость срока службы от глубины разряда, максимальную глубину разряда.

При моделировании системы HOMER не позволяет аккумулятору разрядиться ниже максимальной глубины разряда. Срок службы АКБ рассчитывается на основе уравнения:

$$T_{акб} = \min\left(\frac{n_{акб} C_{акб}}{C_{год}}, T_{акб,f}\right) \quad (5)$$

где $n_{акб}$ — количество аккумуляторных батарей в системе; $C_{акб}$ — емкость одной аккумуляторной батареи; $C_{год}$ — общее количество энергии, необходимое для одного года; $T_{акб,f}$ — срок службы АКБ независимо от количества циклов заряда-разряда.

Также пользователь может определить капитальные затраты на аккумуляторы, стоимость замены АКБ по истечении срока службы и стоимость годового обслуживания.

Выводы: традиционные и возобновляемые источники энергии, как правило, отличаются друг от друга стоимостными характеристиками. Возобновляемые источники, как правило, имеют высокие первоначальные капитальные затраты и низкие эксплуатационные расходы, в то время как традиционные источники имеют

низкие капитальные и высокие эксплуатационные расходы. В процессе оптимизации HOMER сравнивает различные варианты систем с возобновляемыми и традиционными источниками энергии, учитывая как текущие затраты, так и капитальные расходы (рис. 3) [1].

Из недостатков HOMER стоит отметить:

- сложный для освоения интерфейс (требует особого изучения, пользователь должен иметь глубокие знания в сфере ВИЭ);
- пакет не адаптирован для российского пользователя (язык интерфейса — английский);
- пакет не позволяет рассматривать широкий спектр оборудования одного вида (ограничение по ВЭУ не больше 2, может рассмотреть только русловую ГЭС, ограничение по ГЭС не больше 1);
- высокая стоимость программного обеспечения.

ОТЕЧЕСТВЕННЫЕ ПРОГРАММНЫЕ КОМПЛЕКСЫ

После анализа зарубежного опыта с учетом всех преимуществ и недостатков в Уральском федеральном университете началась разработка отечественного программного комплекса для поиска оптимального состава оборудования кластера ВИЭ [2]. На сегодняшний день зарегистрированы три программы:

- «Автоматизированный расчет кластера ВИЭ» (АРК-ВИЭ), написанная в среде пакета Microsoft Excel [3];
- «VIZPO-RES», выполненная в среде «Adobe Flash Professional CS6» на языке программирования Action Script 3.0 [4];
- «VizProRES», выполненная в среде «Adobe Flash Professional CS6» на языке программирования Action Script 3.0 [5].

Эти программы были разработаны на кафедре АСВиЭ УрФУ.

Программа «АРК-ВИЭ» разработана в среде Excel для расчета оптимального кластера ВИЭ. Для решения поставленной задачи используется надстройка «Поиск решения». С ее помощью можно найти наилучшее значение (оптимальный кластер ВИЭ), которое является целевой функцией, учитывая все заданные условия и требования. Надстройка «Поиск решения» изменяет значения в ячейках переменных согласно предъявляемым условиям и в оптимизационной ячейке выводит итог (рис. 4). Нахождение наилучшего кластера ВИЭ является задачей выпуклого программирования [7].

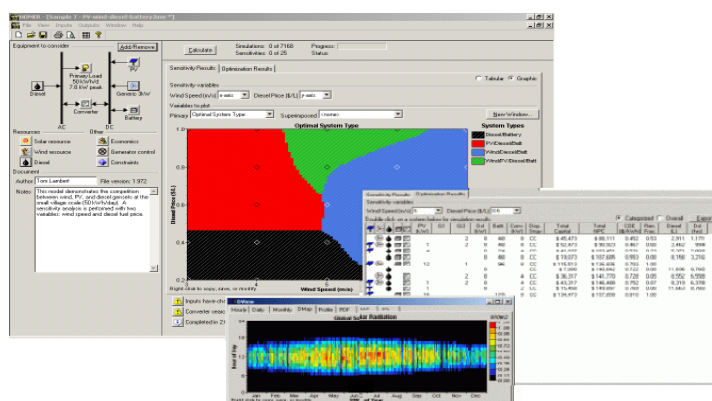


Рис. 3. Окно расчета гибридной системы в программе HOMER

Выберите установку входящую в кластер			Укажите характеристики установок входящих в состав кластера и территориальные показатели									
Состав кластера:	Рассчитан Е. доля	Рекомендуемая мощность установки	Минимальная мощность установки, кВт	Характеристики	Среднее расчетное показатели	Минимальный показатель для начала работы установки	Максимальный показатель для возможности работы установки	Стоимость выработки 1 кВт·ч, руб				
Дизель генератор (ДГ)	<input checked="" type="checkbox"/>	0,90	0,9	1. Потребляемое «во топлива, л/час	30	30	30	30				
Ветроэлектрическая установка (ВЭУ)	<input checked="" type="checkbox"/>	0,00	0,0	2.1. Диаметр ВЭУ, м	3,5	3,5	3,5	3,5				
Ветроэлектрический преобразователь (ВЭП)	<input checked="" type="checkbox"/>	0,00	0,0	1.1. Площадь СКБ % м²	400	400	400	400				
Микро-гидроэлектростанция-1 (МГЭС-1)	<input checked="" type="checkbox"/>	0,00	0,0	13.6. Диаметр ГЭУ, м	0,1	0,1	0,1	0,1				
Микро-гидроэлектростанция-2 (МГЭС-2)	<input checked="" type="checkbox"/>	0,00	0,0	1. Перенос высот, м	0,9	0,9	0,9	0,9				
Биогазовая установка (БГУ)	<input checked="" type="checkbox"/>	1,00	3,1	Кол-во скважин, шт	121	121	121	121				
Тип кластера по составу оборудования			Максимальная мощность кластера, кВт									
Систем-кластер			Доля завышенной мощности									
Тип кластера по мощности			Коэффициент доступной стоимости 1 кВт·ч кластера ВЭУ									
Р - колесный			2,4									

Выберите установку входящую в кластер			Укажите характеристики установок входящих в состав кластера и территориальные показатели									
Состав кластера:	Рассчитан Е. доля	Рекомендуемая мощность установки	Минимальная мощность установки, кВт	Характеристики	Среднее расчетное показатели	Минимальный показатель для начала работы установки	Максимальный показатель для возможности работы установки	Стоимость выработки 1 кВт·ч, руб				
Дизель генератор (ДГ)	<input checked="" type="checkbox"/>	0,56	1,1	2. Потребляемое «во топлива, л/час	25	25	25	25				
Солнечный коллектор (СК)	<input checked="" type="checkbox"/>	0,00	0,0	2. Площадь СКБ % м²	400	400	400	400				
Солнечный коллектор вакуумный (СКВ)	<input checked="" type="checkbox"/>	0,44	0,9	2. Площадь СКБ % м²	10	10	10	10				
Биогазовая установка (БГУ)	<input checked="" type="checkbox"/>	0,00	0,0	2.88. Кол-во скважин, шт	100	100	100	100				
Тепловой насос (ТН)	<input checked="" type="checkbox"/>	0,00	0,0	2.2. Кол-во скважин, шт	20	20	20	20				
Тип кластера по составу оборудования			Максимальная мощность кластера, кВт									
Пыльца-кластер			Доля завышенной мощности									
Тип кластера по мощности			Коэффициент доступной стоимости 1 кВт·ч кластера ВЭУ									
М - средний			0,95									

Рис. 4. Вид экранного меню программы «АРК-ВИЭ»

Целевая функция данной задачи – это минимизация выпуклых функций $f(x)$ на выпуклых множествах $X \subseteq R^n$:

$$f(x^*) = \min_{x \in X} f(x). \quad (6)$$

Для решения поставленной задачи использовалась аналогия с портфельной теорией Марковица (доходность/риск): стоимость электроэнергии или тепловой энергии в зависимости от риска.

Программа «VIZPO-RES» предназначена для визуальной демонстрации изменения зависимости риск-стоимость энергии. Компьютерная программа «VIZPO-RES» выполнена в среде «Adobe Flash Professional CS6» на языке программирования Action Script 3.0 и экспортирована в формат «EXE». При расчете программа использует ковариационную матрицу, формируемую «АРК-ВИЭ», и загружает её из файла формата «txt» для расчета риска энергообеспечения и мощностей долей оборудования с учетом конкретного географического района.

После анализа работы программ «VIZPO-RES» и «АРК-ВИЭ» было решено начать разработку программного комплекса «VizProRES» на основе программы «VIZPO-RES» [2].

Программное обеспечение «VizProRES» позволяет найти оптимальный состав оборудования на базе ВИЭ с учетом полного обеспечения автономного потребителя, для определенного географического района. Нахождение наилучшего состава оборудования производится на основе технико-экономического сравнения нескольких конфигураций, содержащих различные установки возобновляемых источников энергии. VizProRES при расчете оптимального кластера моделирует поведение системы в течение года, учитывая суточные или часовые колебания выработки энергии. Данная компьютерная программа для решения поставленной задачи поиска оптимального состава оборудования использует метод «Ветвей и границ» (рис. 5). Целевой функцией является минимум приведенных затрат за год:

$$y(x_1, x_2, \dots, x_i) = a_0 + a_1 x_1 + \dots + a_i x_i = y_{min} \quad (7)$$

где x_i – количество единиц оборудования i типа; a_i – приведенные затраты за год одной установкой i типа; a_0 – суммарная стоимость топлива, потребляемое системой за год.

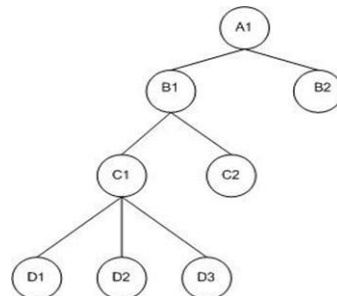


Рис. 5. Графическое представление метода «Ветвей и границ»

При этом нужно учитывать, что вырабатываемая системой энергия должна быть больше или равна потребляемой в каждый момент времени, т. е. должно выполняться условие:

$$\sum_{i=1}^n b_{ij} \cdot x_i \geq E_j \quad (8)$$

где x_i – количество единиц оборудования i типа; b_{ij} – энергия, производимая установкой i типа в j промежуток времени; n – количество типов оборудования в системе; E_j – потребляемая энергия в j промежуток времени. Для полного обеспечения электрической энергией данное условие должно выполняться в каждый промежуток времени в течение всего года.

При анализе работы программы и сравнении её с зарубежными аналогами можно выделить следующие преимущества и недостатки программного пакета.

Преимущества:

- возможность определить оптимальный количественный состав оборудования разных типов;
- легкий для освоения интерфейс, который не требует глубокого изучения;
- адаптация для российского пользователя;
- возможность рассматривать широкий спектр оборудования одного вида.

Недостатки:

- учитываются только основные затраты на оборудование;
- не учитываются колебания нагрузки;
- нет возможности сравнения с подведением ЛЭП;
- на сегодняшний день не учтен риск изменения стохастических данных.

В настоящее время ведется активная модернизация программного комплекса с учетом выявленных недостатков.

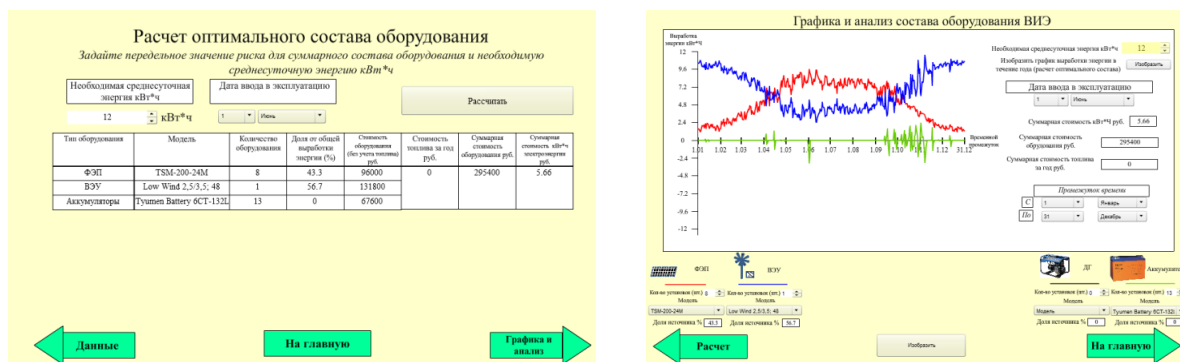


Рис. 6. Программа расчета оптимальной КС ВИЭ «VIZPO-RES»

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Lambert, T., Gilman, P. & Lilienthal, P., Micropower system modeling with HOMER, in Integration of Alternative Sources of Energy, FA Farret and MG Simões. 2006, Wiley-IEEE Press. P. 379-418.
2. RETScreen // Министерство природных ресурсов Канады. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.etscreen.net/ru/home.php> (дата обращения 08.03.2016).
3. Велькин В.И., Денисов К.С., Завьялов А.С., Разработка отечественного комплекса «VIZPO-RES» на основе анализа зарубежных программ расчета ВИЭ // Неделя науки СПбГПУ. – 2014. – СПб. – С. 60-63.
4. Свидетельство о Гос. регистрации программы для ЭВМ № 2013613097, Программа Автоматизированного расчета кластера ВИЭ «АРК-ВИЭ», 25 марта 2013. Велькин В.И., Логинов М.И., Чернобай Е.В.

5. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2014614024, Программа Визуализации поиска оптимального кластера возобновляемых источников энергии (RES) «VIZPO-RES», 14 апреля 2014. Велькин В.И., Денисов К.С., Чернобай Е.В.
6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016610783; Программа расчета и визуализации оптимальной комплексной системы возобновляемых источников энергии (RES) "VizProRES", 19 января 2016. Велькин В.И., Денисов К.С.
7. Справка и обучение по Office // Microsoft Office [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://support.office.com/ru-ru/article/> (дата обращения 08.03.2016).

УДК 621.004.18

А. Н. Лямбель, В. М. Пахалуев, С. Е. Щеклеин

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина,
г. Екатеринбург, Россия

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРООТОПЛЕНИЯ МНОГОКВАРТИРНОГО ДОМА

Представлены результаты экспериментального исследования характеристик теплопотребления многоквартирного жилого дома с электрическим теплоснабжением.

Ключевые слова: электроотопление; эффективность; энергосбережение.

A. N. Lyambel, V. M. Pakhaluev, S. E. Shcheklein

Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

THE ANALYSIS OF THE ELECTRIC HEATING EFFICIENCY OF AN APARTMENT HOUSE

The results of experimental study of heat consumption characteristics of an apartment house with electric heat supply are given.

Key words: electric heat supply efficiency; energy saving.

ВВЕДЕНИЕ

Опыт применения электричества для отопления и горячего водоснабжения в мире насчитывает многие десятилетия. Электроотопление широко используется в

США и других развитых странах. В России, имеющей суровые климатические условия в большинстве регионов, электрическое отопление используется скорее как исключение, чем как правило. И для этого есть причины:

- для выработки электричества требуется в 3 раза больше топлива чем для производства тепловой энергии;

- из-за сурового климата В России (градусо-сутки отопительного периода в РФ достигают 6000 °С·сут., в США 2000 °С·сут.), следовательно и затраты возрастают [1].

Однако существуют примеры намеренного использования электричества для отопления. На рис. 1 приведены примеры систем электрического отопления помещений в детском садике и общеобразовательной школе.



а)



б)

Рис. 1. Электрические конвекторы в детском садике (а) и школе (б)

Использование электрического отопления становится более эффективным при высокой теплозащитности зданий эффективной теплоизоляцией. Но, так как теплоизоляция для своего производства требует энергию, нужно учитывать, что экономия энергии должна быть больше, чем ее затраты [2].

В энергетике существует проблема неравномерности суточного потребления энергии. Разница между дневным и ночным пиковым потреблением может отличаться в 2-5 раз. Поэтому существует необходимость в разработке технологии потребления электроэнергии преимущественно в ночное время, это позволит не только выровнять графики суточного энергопотребления, но и даст возможность сократить затраты на энергию, т. к. ночной тариф является самым экономически привлекательным для потребителей энергии. Для этой цели подходят системы теплоаккумулирования тепла, которые работают в ночное время, накапливая энергию для использования в часы дневного тарифа. В связи с этим необходимо научиться рационально использовать строительные конструкции зданий, т. к. они обладают высокой теплоаккумуляционной способностью.

ОБЪЕКТ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Для решения поставленных задач в городе Екатеринбурге был проведен эксперимент, основой которого стал электродом на ул. Краснолесья, 157. Здание имеет высокую степень тепловой защиты.

Основой системы отопления квартир в электродоме является нагревательный кабель СНКД20 с термо-морозостойкой керамической изоляцией (Селикон), вмонтированный в цементную стяжку пола. Тепло накапливается в бетонных перекрытиях, которые перегреваются на 3-4 °С преимущественно ночью. Для того чтобы компенсировать теплопотери здания в течение суток, в целях недопущения перегрева теплого пола используется комплексная система регулирования.

В состав системы входят:

- 1) резистивные нагревательные кабели;
- 2) программируемые терморегуляторы с датчиками температуры пола и воздуха;
- 3) саморегулирующиеся нагревательные кабели;
- 4) силовые кабели;
- 5) шкафы управления электроотоплением;
- 6) терморегуляторы с датчиками температуры воздуха.

Разработчики проекта утверждают, что экономия достигает до 30 % на платежах по отоплению за счет бетонной подушки, в которую монтируются их системы по сравнению с традиционным водным отоплением.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На рис. 2 представлено ежемесячное потребление электроэнергии для отопления в исследуемом доме.

В табл. 1 представлено ежемесячное электропотребление в отопительный период в доме по адресу Краснолесье, 157 по подъездам дома.

Значения удельного электропотребления за отопительный период:

$$q_{уд}^{д(н)} = \mathcal{E} \Gamma^{д(н)} / (S \cdot n), \text{ кВт} \cdot \text{ч} / (\text{м}^2 \cdot \text{мес}), \quad (1)$$

где $q_{уд}^{д(н)}$ – удельное электропотребление на дневном (ночном) тарифе; $\mathcal{E} \Gamma^{д(н)}$ – годовое электропотребление на дневном (ночном) тарифе, кВт·ч; n – количество месяцев отопительного периода; S – суммарная площадь квартир, м².

$$q_{уд}^д = 296119,05 / (6874,1 \cdot 8) = 5,72 \text{ кВт} \cdot \text{ч} / (\text{м}^2 \cdot \text{мес}),$$

$$q_{уд}^н = 388698,36 / (6874,1 \cdot 8) = 7,51 \text{ кВт} \cdot \text{ч} / (\text{м}^2 \cdot \text{мес}),$$

$$q_{уд} = (q_{уд}^д + q_{уд}^н) = 13,23 \text{ кВт} \cdot \text{ч} / (\text{м}^2 \cdot \text{мес}).$$

СРЕДНЕМЕСЯЧНЫЙ РАСХОД ФИНАНСОВЫХ СРЕДСТВ НА ЭЛЕКТРООТОПЛЕНИЕ

Удельный расход средств на электроотопление определяется:

$$Сэ/э = \mathcal{E} д \cdot Тд + \mathcal{E} н \cdot Тн, \text{ руб} / (\text{м}^2 \cdot \text{мес}), \quad (2)$$

где $Тд(н)$ – тариф на электроэнергию дневной (ночной).

$$\begin{aligned} Сэ/э &= 5,72 \cdot 2,64 \text{ руб} / \text{кВт} \cdot \text{ч} + 7,51 \cdot 1,26 \text{ руб} / \text{кВт} \cdot \text{ч} = \\ &= 24,56 \text{ руб} / (\text{м}^2 \cdot \text{мес}). \end{aligned}$$

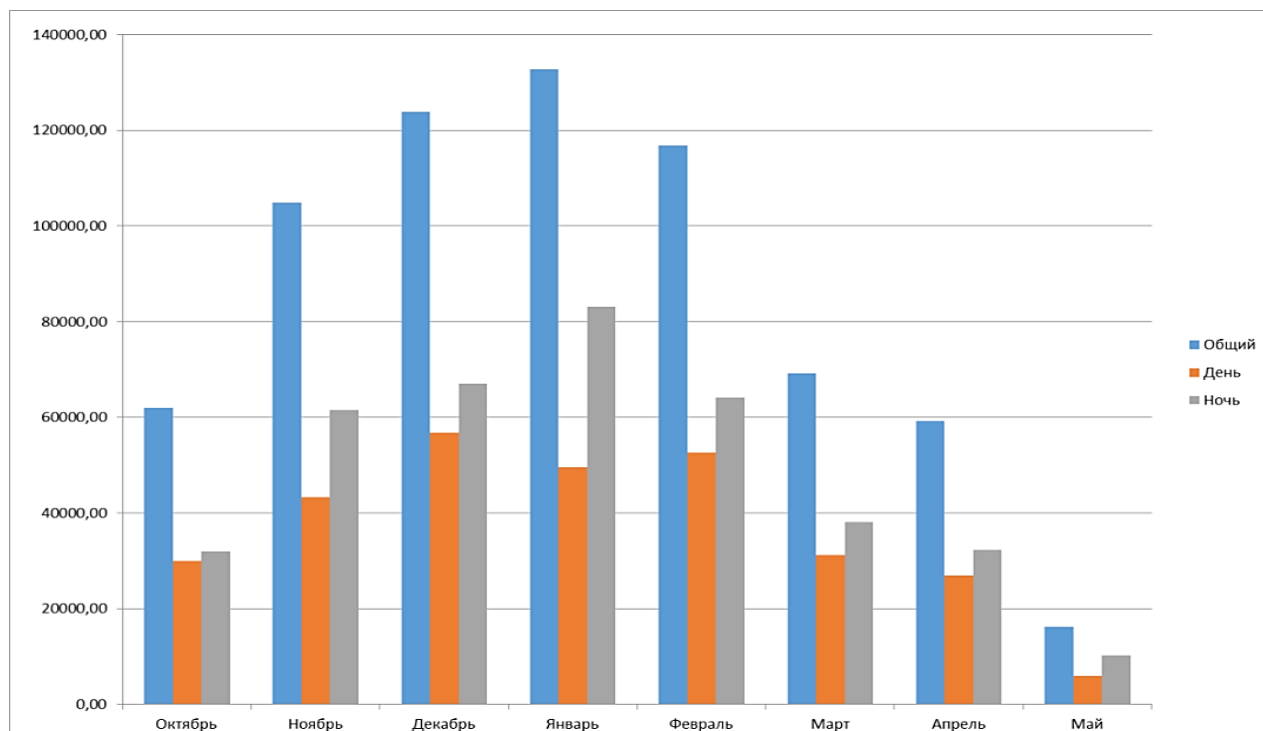


Рис. 2. Потребление электроэнергии, кВт·ч, для отопления электродома

Таблица 1

Энергопотребление за отопительный период, кВтч, по подъездам дома

№ подъезда	№ квартир	№ прибора учета	Суммарная площадь квартир	Тариф	Октябрь	Ноябрь	Декабрь	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	ГОД
подъезд 1	1-23	008840055001710	1613,8	Д	5760,12	8198,82	10953,48	9954,48	11198,76	7568,64	6555,78	1612,02	61802,10
				Н	6564,66	11382,24	12565,62	15949,74	13330,44	8773,74	7484,34	2564,94	78615,72
	24-43	008840055001762	844,9	Д	3781,47	7821,96	9252,39	7938,45	8703,24	5432,46	4570,44	1341,18	48841,59
				Н	4172,79	11330,10	11236,08	13708,83	11402,25	6913,71	5705,55	1990,53	66459,84
подъезд 2	44-71	008840055001792	1611,2	Д	8802,72	10900,32	14487,12	12576,48	12816,96	6984,00	6943,38	1404,78	74915,76
				Н	9024,90	15344,46	16602,96	20863,62	15273,78	8853,00	8139,12	2697,90	96799,74
	72-86	008840054000398	842,8	Д	3288,54	5294,73	7711,86	6431,31	6905,37	3697,68	2741,34	450,36	36521,19
				Н	3507,81	7668,75	8847,60	11324,52	8353,95	4818,99	3561,30	992,16	49075,08
	87-101	008840056001805	840,4	Д	3758,25	4650,21	6384,24	5595,96	5837,28	3198,84	2563,02	505,14	32492,94
				Н	3892,26	6777,39	7710,63	9387,00	7278,75	3770,52	3123,42	900,06	42840,03
	102-121	008840056001821	1121	Д	4540,29	6386,01	7961,13	7018,80	7161,21	4266,12	3574,41	637,50	41545,47
				Н	4838,10	9091,11	10079,31	11911,08	8560,38	4950,21	4337,46	1140,30	54907,95
			ИТОГО ДЕНЬ		29931,39	43252,05	56750,22	49515,48	52622,82	31147,74	26948,37	5950,98	296119,05
			ИТОГО НОЧЬ		32000,52	61594,05	67042,20	83144,79	64199,55	38080,17	32351,19	10285,89	388698,36

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗДАНИЯ

Приведенные в табл. 1 данные позволяют также оценить энергетические характеристики здания с точки зрения эффективности тепловой защиты в суровых климатических условиях Урала.

Удельное среднегодовое потребление электроэнергии:

$$\mathcal{E}_\Gamma = (\mathcal{E}_\Gamma^{\text{д}} + \mathcal{E}_\Gamma^{\text{н}}) / S_{\text{кв}} \quad (3)$$

где \mathcal{E}_Γ – удельное электропотребление, кВт·ч/(м²·год); $\mathcal{E}_\Gamma^{\text{д(н)}}$ – удельное годовое электропотребление дневное (ночное), кВт·ч.

$$\mathcal{E}_\Gamma = 684817,41 / 6874,1 = 99,6 \text{ кВт·ч/(м}^2\text{·год)}.$$

АНАЛИЗ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для оценки эффективности электрической системы отопления сравним полученные результаты с данными соседнего здания в Академическом микрорайоне, снабжаемого тепловой энергией от котельной на газовом топливе.

На рис. 3 приведены данные для этого здания по показаниям узлов учета тепловой энергии, установленных в ИТП. При анализе учитываются следующие параметры: количество тепловой энергии, потребленной на нужды отопления, отапливаемая площадь и продолжительность отопительного периода. Определяется количество тепловой энергии (Гкал), потребленной на 1 кв. метр площади в месяц, и расход финансовых средств на тепловую энергию.

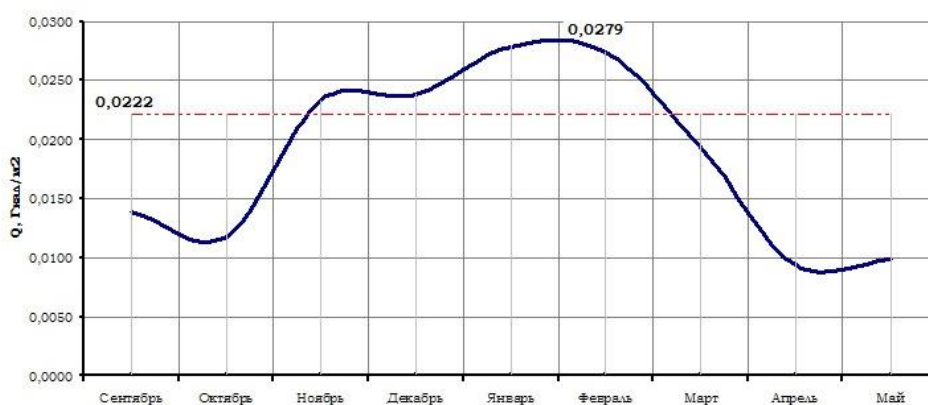
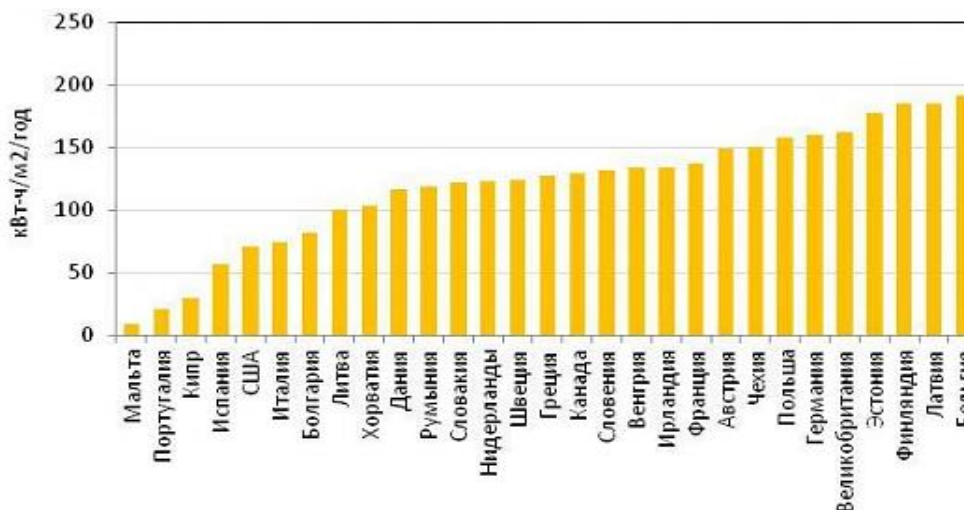
Рис. 3 Потребленная тепловая энергия по показаниям узлов учета (<http://akademeb.ru/>)

Рис. 4. Удельные расходы энергии в жилых зданиях ряда стран мира [3]

Как видно из рис. 3, среднемесячное потребление тепловой энергии ($q_{уд}$) за отопительный период составило 0,0222 Гкал/($м^2 \cdot мес$),

$$q_{уд} = 25,8 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/(\text{м}^2 \cdot \text{мес}).$$

Среднемесячный расход финансовых средств на тепловую энергию:

$$C_{тэ} = T_{тэ} \cdot q_{уд} \quad (4)$$

где $T_{тэ}$ – тариф тепловой энергии по данным управляющей компании Академический (<http://www.uk-akadem.ru/obekty/blok29/421/>)

$$C_{тэ} = 1331,1 \text{ руб}/\text{Гкал} \cdot 0,0222 \text{ Гкал}/(\text{м}^2 \cdot \text{мес}) = 29,55 \text{ руб}/(\text{м}^2 \cdot \text{мес}).$$

Энергетические характеристики здания с точки зрения эффективности тепловой защиты почти в 2 раза выше показателя по России (рис. 4) и превосходят большинство стран ЕС.

Экономия средств для электроотопления по сравнению с централизованным теплоснабжением квартиры площадью 100 $м^2$:

$$\Delta C = (C_{тэ} - C_{э}) \cdot n \cdot 100, \text{ руб}/\text{год} \quad (5)$$

$$\Delta C = (29,55 - 24,56) \cdot 8 \cdot 100 = 4000 \text{ руб}.$$

Годовая экономия составила 4000 руб. Анализ данных учета энергии, затрачиваемой на отопление в домах с разной системой отопления (автономное электрическое и централизованное), позволяет сделать вывод,

что наиболее привлекательной и экономически выгодной оказалась система, использующая электронагрев как способ обогрева квартиры.

Также такая система позволяет накапливать тепло в ночные часы, когда тариф на электроэнергию для потребителя самый низкий. Помимо этого, используя теплоаккумуляционную способность данной системы, имеется возможность выравнять графики нагрузки энергопотребления в целом, что снизит загрузку сетей и энергоисточников в часы пик и снизит глубину ночного провала энергопотребления.

ВЫВОДЫ

1. Высокая степень тепловой защиты здания обеспечивает низкий уровень энергопотребления в суровых климатических условиях Уральского региона.
2. Аккумулирующие способности здания позволяют осуществить ночное накопление энергии с сокращением потребления электрической энергии в дневные часы.
3. Общее энергопотребление здания ниже, чем у аналогичного, снабжаемого теплом от теплоцентрали.
4. Финансовые затраты на отопление электродома ниже, чем у аналогичного, снабжаемого теплом от теплоцентрали, на 17 %, что дает экономию средств за отопительный период 4000 рублей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ливчак В.И. Градусо-сутки отопительного периода, как инструмент сравнения уровня энергоэффективности зданий в России и в других странах // Энергосбережение. – 2015. – №6.
2. Щеклеин С.Е., Шастин А.Г. К проблеме термодинамической оптимизации тепловой защиты зданий // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. 2015. № 8-9 (172-173). С. 63-69.
3. Башмаков И.А. Сравнение уровней энергоэффективности зданий в России и зарубежных странах // Энергосбережение. – 2015. – № 3.

УДК 621.22

Л. Е. Лях, А. И. Попов

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина,
г. Екатеринбург, Россия

БЕСПЛОТИННАЯ ГЭС С ПРИНУДИТЕЛЬНЫМ РАЗГОНОМ ТЕКУЩЕГО ПОТОКА

Группа изобретений относится к области гидроэнергетики и может быть использована для получения электрической энергии от использования гидравлических потоков, в том числе с малой скоростью движения воды. В варианте единичного агрегата устройство содержит накопительную емкость воды, заполняемую потоком, разгонное устройство, турбину, установленную в емкости и соединенную через редуктор с генератором. В качестве разгонного устройства использован поворотный лопастной прерыватель потока, соединенный тягой с поплавковым регулятором уровня воды в емкости. В варианте нескольких агрегатированных устройств, устанавливаемых в потоке, их турбины объединены общим валом и подключены через мультипликатор к электрическому генератору, а их поплавок-регуляторы уровня воды в емкостях устанавливаются на разных уровнях, что обеспечивает их последовательное включение. Повышается эффективность бесплотинной ГЭС.

Ключевые слова: гидроэнергетика; малые ГЭС; эффективность; бесплотинная ГЭС; принудительный разгон потока.

L. E. Lyakh, A. I. Popov

Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

THE DAMLESS HYDRO POWER PLANT WITH THE FORCED ACCELERATION OF THE STREAM

The group of inventions relates to the field of hydropower and can be used to produce electrical energy from hydraulic streams, including streams with a slow rate of water movement. A single unit contains a water accumulating tank filled by the stream, an accelerating device, a turbine mounted in the tank and connected through a gearbox with the generator. A rotary bladed flow breaker connected with a float tank water level controller is used as an accelerating device. In the case of several units in the flow their turbines have a common shaft and are connected to an electrical generator via a multiplier. The float water level controllers in the tanks are set on the different levels to ensure their consistent switching on. The efficiency of a damless hydro power plant is increased.

Key words: hydropower; small HPP; efficiency; damless HPP; forced stream acceleration.

ВВЕДЕНИЕ

В Российской Федерации и, в частности, на Урале сосредоточено большое количество малых рек с медленным течением, на которых установка бесплотинных малых ГЭС (МГЭС) неэффективна, поэтому сотрудниками кафедры «Атомные станции и возобновляемые источники энергии» была разработана модель бесплотинной ГЭС (БГЭС) с принудительным разгоном текущего потока.

Технический результат предлагаемого решения заключается в следующем:

- повышена эффективность БГЭС в варианте предварительного накапливания энергии воды в емкости путем перекрытия потока поворотным лопастным прерывателем и последующего порционного импульсного спуска воды на турбину;
- повышена эффективность БГЭС в варианте установки нескольких подобных агрегатов параллельно друг другу в потоке и объединения кинематически их валов на общий вал редуктора, при этом обеспечивается поочередный спуск воды с агрегатов на турбину;
- повышена эффективность БГЭС за счет использования турбины от волновой энергетической установки, имеющей в ободе рабочего колеса тангенциальные

пазы, более надежно захватывающие и отрабатывающие энергию импульсного потока.

Предложенное техническое решение может найти широкое применение при создании русловых бесплотинных гидроэлектростанций, в том числе и на очень слабых низкоскоростных речных потоках.

КОНСТРУКЦИЯ БГЭС

На рис. 1 изображена БГЭС в варианте единичного агрегата, вид сбоку со снятой передней стенкой емкости, а на рис. 2 – вариант структурной схемы БГЭС в составе нескольких агрегатированных подобных устройств, нагруженных на мультипликатор через общий вал турбин (вид сверху).

Бесплотинная ГЭС в варианте единичного агрегата содержит емкость 1, в которую вмонтированы лопастной прерыватель потока 2, поплавковый регулятор 3 уровня воды в емкости, тяга 4 от которого другим концом соединена с упором 5, подпружиненным пружиной 6. В емкость вмонтирована турбина 7, вал которой соединен с нагрузкой.

Бесплотинная ГЭС в варианте нескольких агрегатированных устройств содержит несколько емкостей с аналогичными механизмами, но оси их турбин объединены общим валом, который соединен с валом повышающего редуктора (мультипликатора) 8, подключенного в свою очередь к электрическому генератору 9, причем поплавковые регуляторы уровня воды в емкостях установлены на разных уровнях.

Бесплотинная ГЭС с принудительным разгоном текущего потока в варианте единичного агрегата работает следующим образом. Агрегат БГЭС устанавливается в речной поток V (рис. 1). После наполнения водой емкости 1 до определенного уровня срабатывает поплавковый регулятор 3, который тянет тягу 4 вверх, при этом упор 5 движется вниз и освобождает лопасть прерывателя 2 потока, причем прерыватель под давлением воды поворачивается, пропуская на турбину 7 порцию воды. Уровень воды в емкости 1 резко падает, поплавков регулятора 3 опускается книзу, ослабевает натяжение тяги 4, и пружина 6 возвращает упор 5 в исходное положение, при этом в него упирается очередная лопасть повернувшегося прерывателя 2 потока для накопления очередной порции воды. Далее работа так же циклично повторяется в автоматическом режиме.

Бесплотинная ГЭС с принудительным разгоном текущего потока в варианте нескольких агрегатированных устройств работает следующим образом. Для того чтобы увеличить ее мощность и более равномерно передавать импульсы силы от порций воды на турбину 7, в речной поток V устанавливается несколько подобных агрегатов, оси турбин которых кинематически связаны общим валом с редуктором 8, нагруженным на генератор 9 (рис. 2). Для того чтобы импульсные порции воды на турбины поступали со сдвигом во времени, поплавковые регуляторы 3 в агрегатах установлены на разных уровнях. Возможен вариант конструкции БГЭС (не показан на рис. 2), когда потоки воды после выходов от лопастных прерывателей 2 объединяются в одно русло и подаются на одну турбину.

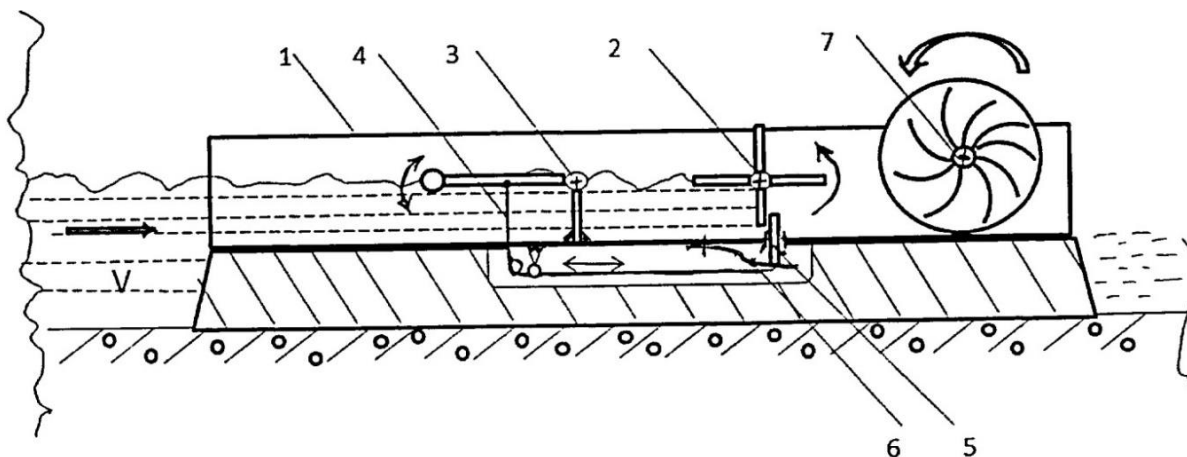


Рис. 1. БГЭС в варианте единичного агрегата, вид сбоку со снятой передней стенкой емкости

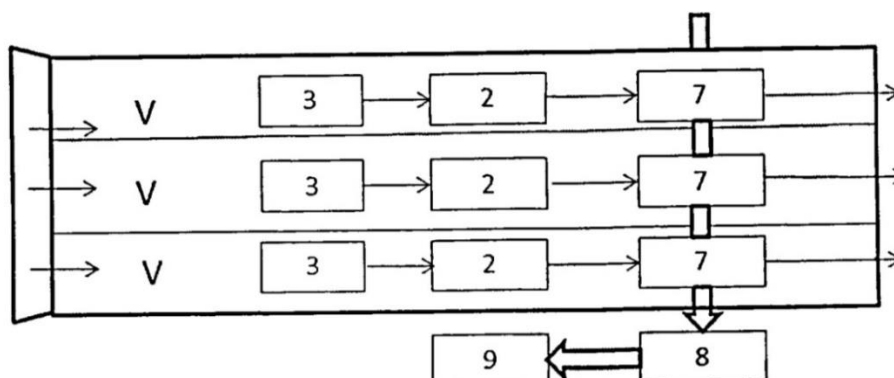


Рис. 2. Структурная схемы БГЭС в составе нескольких агрегатированных подобных устройств

Турбина 7, представленная на рис. 1 в виде лопастного колеса, может быть заменена рабочим колесом из «Волновой энергетической установки» Пресмана С.Д.» по авторскому свидетельству СССР № 1355754, F03B 13/12 [6]. В данной конструкции обод рабочего колеса имеет глухие тангенциальные пазы с наружной стороны ободьев. Вода, ударяясь в торцы пазов, вызывает вращение колеса с большим КПД. Рабочие колеса объединены в секции, а ободья с пазами смещены в окружном направлении относительно пазов соседних секций.

В предложенную бесплотинную ГЭС между турбиной 7 и прерывателем потока 2 может быть также подключен гидравлический таран по аналогии с «Бесплотинной гидроэлектростанцией» авторов Шестакова Я.И., Багаутдинова И.И. и др. по патенту РФ №2241092, МПК E02B 9/00 [7]. В этом конструктивном варианте вода с помощью гидравлического тарана может быть поднята на значительную высоту и оттуда подаваться на турбину (не показано на чертеже). Это усложнит конструкцию, но позволит использовать более мощную турбину и, соответственно, получить на выходе БГЭС большую электрическую мощность.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По мнению авторов, предложенная БГЭС отличается простотой конструкции и обслуживания, не требует дополнительных устройств автоматизации и может

найти широкое применение в народном хозяйстве в качестве мобильных русловых генераторов электрической энергии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Савчук А.Д., Болтрушевич В.В., Кузнецов Р.С. Гидроэлектростанция. Патент РФ №2303707, F03B 13/00. Патентообладатель Военный инженерно-технический университет РФ (аналог).
2. Блинов Б.С. Гирляндные гидроэлектростанции. М., 1963.
3. Попов А.И., Щеклеин С.Е. Преобразователь энергии потока. Патент на полезную модель РФ № 101379, МПК F03D 1/00. Патентообладатель Уральский федеральный университет (аналог).
4. Патент Японии JP60-45786A, 12.03.1965, F03B 17/02. Энергосистема для принудительного разгона воды (аналог).
5. Яковенко А.Л., Ушакова А.А. и др. ГЭС с принудительным разгоном потока. Патент РФ № 2447229, F03B 9/00. Патентообладатель ФГОУ ВПО «Московский госуниверситет природообустройства» (прототип).
6. Пресман С.Д. Волновая энергетическая установка Пресмана С.Д. Авторское свидетельство СССР № 1355754, F03B 13/12 (аналог).
7. Шестаков Я.И., Багаутдинов И.Н. Бесплотинная гидроэлектростанция. Патент РФ № 2241092, МПК E02B 9/00 (аналог).

УДК 621.365.5

А. Ю. Борисов, Е. И. Маринкова, А. А. Шабурова, В. Э. Фризен

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина,
г. Екатеринбург, Россия

ВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ ИНДУКЦИОННЫЙ НАГРЕВ АЛЮМИНИЕВЫХ ПРЕКУРСОРОВ

В докладе приведены результаты компьютерного и экспериментального исследования нагрева пеноалюминия в индукторе при повышенной частоте. Продемонстрирована адекватность математической и компьютерной модели данного процесса.

Ключевые слова: пеноалюминий; порофор; прекурсор; индукционный нагрев; дегидротация.

A. Y. Borisov, E. I. Marinkova, A. A. Shaburova, V. E. Frizen

Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

ALUMINUM PRECURSORS HIGH FREQUENCY INDUCTION HEATING

This paper presents the results of computer and experimental study of foam aluminum heating in the inductor at high frequency. It is demonstrated the adequacy of mathematical and computer models of this process.

Key words: foam aluminum; porophore; precursor; induction heating; dehydration.

ВВЕДЕНИЕ

Пеноалюминий представляет собой алюминиевый сплав ячеистого строения, который состоит из запол-

ненных газом металлических ячеек, содержащих более 60% закрытых пор. Полуфабрикаты из пеноалюминия изготавливают методом вспенивания из прекурсоров. Прекурсор – это прессованная и холоднокатанная заготовка из нагретого порошка алюминиевого

сплава с добавкой порофора. Порофор (порообразователь) – вещество, разлагающееся при нагревании с выделением газа. В качестве такого вещества выступает порофор – гидрид титана (TiH_2). Вспенивание – это процесс увеличения объема материала с образованием ячеистой структуры за счет выделения газа в объеме этого материала.

Такое ячеистое строение придает пеноалюминию высокие удельные характеристики прочности и жесткости, низкую теплопроводность, способность поглощать энергию как акустическую, так и электромагнитную, а также высокие демпфирующие свойства (поглощение механической энергии) в сочетании с легкостью и негорючестью.

Основной операцией технологического цикла получения пеноалюминия, является вспенивание. Было проведено моделирование процесса в программном пакете ELCUT. Задачи магнитного поля переменных токов, стационарная и нестационарная теплопередача решались совместно и позволили промоделировать технологический процесс на всех стадиях нагрева. Рассчитанная мощность, выделяемая непосредственно в испытываемом образце на каждом этапе, позволила определить оптимальное время, необходимое для формирования газовых пузырьков в металлическом расплаве с фиксацией их при его кристаллизации. Процесс образования пор начинается с появлением жидкой фазы в интервале кристаллизации за счет дегидротации, поэтому очень важно не допустить случая, когда температура превышает температуру предплавления, так как пузырьки водорода прорывают окисную пленку, что ведет к осаждению полученной пены. Вследствие этого, важнейшими параметрами процесса являются время и температурные условия вспенивания. Применение индукционного нагрева для вспенивания заготовок из пеноалюминия даст существенно снизить промежуток вспенивания, что позволит:

- снизить время на технологическую операцию (вспенивание) и повысить производительность;
- обеспечить визуальный контроль процесса вспенивания;
- обеспечить быстрое охлаждение;
- исключить выгрузку из печи находящегося в твердотвердом состоянии пеноалюминия, что может привести к образованию дефектов, таких как трещины (разрывы) на поверхности плиты.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

По результатам расчета, проведенного в пакете Mathcad, была создана лабораторная установка высокочастотного индуктора для нагрева алюминиевых прекурсоров (рис. 1). В качестве испытываемого образца был выбран алюминиевый прекурсор, размерами $50 \times 50 \times 5 \text{ мм}^3$ и массой 40 г.

Интересным опытом стал нагрев прекурсора в цементной коробке. Целью данного эксперимента было стремление добиться горизонтального увеличения объема прекурсора в условиях ограниченной свободы увеличения в вертикальном направлении. Опыт не оправдал ожиданий и требует дальнейшего исследования, возможным фактором неудачи оказалась недостаточная масса цементной крышки, которая приподнялась при вспенивании прекурсора.



Рис. 1. Лабораторная установка индукционного нагрева алюминиевых прекурсоров в действии

Еще одним весьма показательным стал опыт нагрева прекурсора до состояния неполного вспенивания, последующего охлаждения и повторного нагрева. Эксперимент показал невозможность повторного вспенивания до максимального объема, поскольку нагретый вновь до температуры плавления прекурсор, имеющий ячеистую структуру, подвержен расплавлению.

РЕЗУЛЬТАТЫ

По итогам математического расчета и компьютерного моделирования была выявлена хорошая сходимость результатов, проверенная экспериментально. Мощность, выделяемая в образце на осуществление технологического процесса, была в среднем 348 Вт. Разница во времени нагрева при моделировании и в ходе эксперимента до температуры предплавления составила 24 секунды. Время образования пены оказалось равным рассчитанному в Mathcad, разница составила лишь 2 секунды.

Также стоит отметить, что параметры индуктора меняются в процессе нагрева прекурсора, и поэтому необходимо дальнейшее изучение вопроса: увеличение КПД индуктора, оптимизация времени нагрева, вспенивания и кристаллизации алюминиевого прекурсора.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бутарович Д.О., Смирнов А.А., Рябов Д.М. Пеноалюминий как энергопоглощающий материал и его механические свойства // Машиностроение. -2011. - №7. – С. 53-58.
2. Слухоцкий А.Е., Рыскин С.Е. Индукторы для индукционного нагрева. Л.: «Энергия», 1974. – 264 с.

УДК 621.1.01 (075.8)

В. М. Пахалуев, С. Е. Щеклеин, А. В. Матвеев

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина,
г. Екатеринбург, Россия

ГЕЛИОСИСТЕМА С СЕЗОННЫМ АККУМУЛЯТОРОМ ТЕПЛОТЫ

Рассматривается проблема переноса во времени солнечной энергии из периода максимальной инсоляции (лето) в период с наибольшей потребностью в энергии (зима). Разработана физическая и математическая модель, связывающая приход солнечной радиации с характеристиками ассимиляции ее грунтовым аккумулятором теплоты. Приведены примеры использования модели для условий Уральского региона России.

Ключевые слова: солнечная энергия, солнечный коллектор, накопитель теплоты, сезонное аккумулирование.

V. M. Pahaluev, S. E. Shcheklein, A. V. Matveyev

Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

THE SOLAR SYSTEM WITH A SEASONAL HEAT ACCUMULATOR

The problem of solar energy transfer from the time period of maximum solar insolation (summer) to the period of most power requirements (winter) is considered. A physical and mathematical model is developed, linking the parish of solar radiation with the characteristics of its assimilation by the earth heat accumulator. The examples of the model use for the conditions of the Ural region of Russia are given.

Key words: solar energy, solar collector, heat accumulator, seasonal accumulation.

ВВЕДЕНИЕ

Характерной особенностью систем, использующих солнечную энергию, является несовпадение времени поступления и потребления тепловой энергии при горячем водоснабжении и теплоснабжении жилых зданий и производственных помещений. В летний период гелиосистемы производят значительное количество не востребованной тепловой энергии, а в зимний период имеет место дефицит теплоты. Поэтому для таких систем необходимы устройства для аккумулирования энергии.

Целесообразность сезонного аккумулятора теплоты (САТ) определяется его способностью накапливать и сохранять длительное время необходимое количество тепловой энергии. Для аккумулирующих систем основным показателем является продолжительность периодов накопления теплоты в летний сезон и сохранение ее для использования в зимний период. Этой задаче отвечает САТ с тепловой изоляцией по границам аккумулятора.

Одним из вариантов САТ служит грунтовой накопитель теплоты, представляющий собой ограниченный теплоизоляцией массив грунта, в котором осуществляется подвод и съем теплоты, а сам массив грунта служит аккумулирующим материалом. Грунтовой аккумулятор без тепловой изоляции характеризуется значительными потерями энергии как накопитель теплоты. Использование современных теплоизоляционных материалов позволяет поддерживать необходимый температурный уровень при отсутствии отопительной нагрузки [1–3].

РАБОТА СЕЗОННОГО АККУМУЛЯТОРА ТЕПЛА В ПЕРИОД ЗАРЯДКИ

Установка для исследования эффективности работы САТ включает в себя двухконтурную гелиосистему с водяным баком-накопителем теплоты суточного цикла работы и аккумулятор с грунтовым теплоизолированным массивом (рис. 1). Период накопления теплоты характеризуется повышением средней по объему температуры аккумулятора и определяется тепловой энергией, поступающей от водонагревателя, включающего солнечные коллекторы и бак-накопитель, с учетом тепловых потерь САТ через теплоизоляцию:

$$\left(c_p \rho V_{\text{САТ}}\right) \cdot \frac{d\Theta}{d\tau} = Q_{\text{СК}} - Q_{\text{пот}} = q(\tau) F_{\text{СК}} \eta_{\text{СК}} \eta_{\text{б}} - k \Theta S_{\text{САТ}}, \quad (1)$$

где c_p – теплоемкость САТ; ρ – плотность САТ; $V_{\text{САТ}}$ – объем САТ; $\Theta(\tau)$ – разность среднеемкостной температуры САТ и температуры окружающего грунта; $q(\tau)$ – плотность солнечной радиации на поверхность солнечного коллектора; $F_{\text{СК}}$ – площадь солнечного коллектора (СК); $\eta_{\text{СК}}$ – средний КПД солнечного коллектора; $\eta_{\text{б}}$ – КПД бака-накопителя; k – коэффициент теплопередачи через теплоизоляционную поверхность; $S_{\text{САТ}}$ – наружная площадь поверхности САТ.

Повышение температуры САТ в процессе его зарядки энергией от солнечного коллектора соответствует уравнению

$$\Theta(\tau) = B \cdot A \cdot \int_0^{\tau} q(\tau) d\tau, \quad (2)$$

где

$$B = F_{CK} \eta_{CK} \eta_6 (c_p \rho V_{CAT})^{-1}, \quad (3)$$

$$A = \exp\left(-\frac{0,5k \cdot S_{CAT}}{c_p \rho V_{CAT}}\right). \quad (4)$$

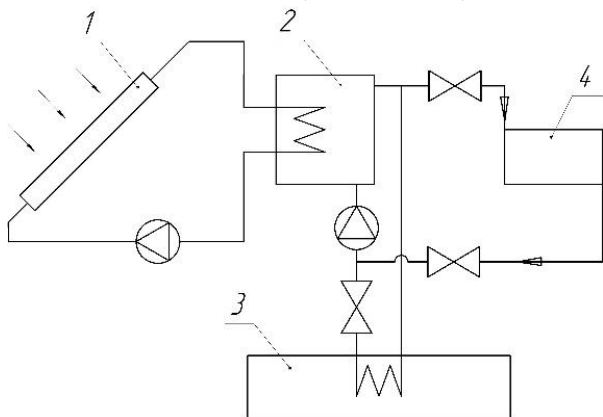


Рис. 1. Принципиальная схема гелиосистемы с сезонным аккумулятором теплоты: 1 – солнечный коллектор, 2 – промежуточный бак-аккумулятор; 3 – сезонный накопитель теплоты; 4 – потребитель

Значение суммарной солнечной радиации за летний период (месяц, три месяца, шесть месяцев) зарядки САТ определяется суммарным значением интенсивности радиации за этот период:

$$\int_0^{\tau} q(\tau) d\tau = \sum_{i=1}^N (q_i \cdot \Delta\tau_i) = \sum_{i=1}^N (Q_i^{\text{мес}}), \quad (5)$$

где $Q_i^{\text{мес}}$ – среднемесячная интенсивность радиации; N – число месяцев зарядки САТ.

В качестве примера на рис. 2 приведены значения интенсивности солнечной радиации в течение года для г. Екатеринбурга.

Анализ полученного соотношения (2) проводился для формы аккумулятора в виде прямоугольного параллелепипеда с одинаковыми размерами сторон и высотой, равной их половине. В этом случае соотношение между поверхностью и объемом САТ можно выразить как

$$S_{CAT} = 6,35 \cdot V_{CAT}^{0,67}. \quad (6)$$

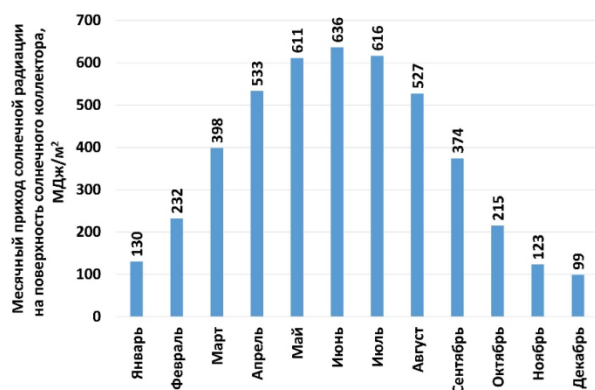


Рис. 2. Изменение суммы солнечной радиации, приходящей на плоскость солнечного коллектора, за каждый месяц в течение года для условий Екатеринбурга

Тепловые потери аккумулятора определяются коэффициентом теплопередачи через слой изоляции к окружающему грунту в виде суммы термических сопротивлений самой изоляции $R_{из}$ и на границе ее поверхности к грунту $R_{гр}$ [4].

$$k = (R_{из} + 2R_{гр})^{-1} = \left(\frac{\delta_{из}}{\lambda_{из}} + \frac{0,75}{\pi \lambda_{гр} V_{CAT}^{0,33}} \right)^{-1}, \quad (7)$$

где $\delta_{из}$ – толщина слоя теплоизоляции; $\lambda_{из}$ – коэффициент теплопроводности изоляции; $\lambda_{гр}$ – коэффициент теплопроводности грунта. При толщине изоляции $\delta_{из} = 0,5$ м и $\lambda_{из} = 0,04$ Вт/(м·К) значение $k = 0,08$ Вт/(м²·К) остается практически неизменным при $V_{CAT} = 50 \dots 500$ м³.

Таким образом, конечная температура нагрева САТ в расчете на 1 м² площади солнечного коллектора при средних значениях $\eta_{CK} = 0,6$ и $\eta_6 = 0,8$ [5], а также при постоянном значении параметров массива грунта $(c_p \rho)_{CAT} = 2,1 \cdot 10^6$ Дж/м³ определяется объемом аккумулятора V_{CAT} и продолжительностью зарядки $\tau_{зар}$ при соответствующей данному региону значениям суммарной солнечной радиации за этот период.

Используя данные интенсивности солнечной радиации (рис. 2), получены расчетные зависимости конечной температуры нагрева САТ, приходящейся на 1 м² площади солнечного коллектора в зависимости от объема аккумулятора и продолжительности зарядки в течение 1, 3 и 6-ти летних месяцев для условий г. Екатеринбурга.

Как следует из рис. 3, при $V_{CAT} = 300$ м³ размеры сторон аккумулятора составляют 8,4 м при высоте 4,2 м, причем для нагрева САТ за летний период (6 месяцев) до температуры $\Theta_0 = 60$ °С требуется площадь солнечного коллектора 20 м², а для $V_{CAT} = 500$ м³ площадь 75 м². Температура окружающего грунта принималась в расчетах постоянной 10 °С.

РАБОТА СЕЗОННОГО АККУМУЛЯТОРА ТЕПЛА В ОТОПИТЕЛЬНЫЙ ПЕРИОД

Количество тепловой энергии, которое может храниться в САТ и в дальнейшем использоваться для отопления определяется конечной температурой аккумулятора в результате его зарядки и минимальной температурой хранения, которая обычно принимается равной температуре окружающего грунта 8–12 °С. Тепловые потери в этот период обусловлены кондуктивным теплообменом аккумулятора через слой изоляции.

Работа САТ в период разрядки при фиксированной отопительной нагрузке отвечает уравнению

$$(c_p \rho V_{CAT}) \cdot \frac{d\Theta}{d\tau} + k \Theta S_{CAT} = -Q_{om}, \quad (1)$$

где $\Theta(\tau)$ – избыточная температура массива аккумулятора по отношению к температуре окружающего

грунта; $Q_{от}$ – значение отопительной нагрузки в зимний период.

Продолжительность работы САТ при выбранной отопительной нагрузке в режиме прямого отопления (без теплового насоса) определяется

$$\tau = (c_p \rho)_{САТ} \cdot k^{-1} \left(\frac{S_{САТ}}{V} \right)^{-1} \cdot \ln \frac{(1+a)}{\left(\frac{\Theta}{\Theta_0} + a \right)} \quad (2)$$

$$a = \frac{Q_{от}}{\Theta_0} \cdot (k \cdot S_{САТ})^{-1} \quad (3)$$

где Θ – конечная температура охлаждения САТ при разрядке; Θ_0 – максимальная температура аккумулятора при зарядке.

При анализе уравнения (9) температурный режим работы аккумулятора выбирался для условий

напольного отопления («теплый пол») с минимальной температурой охлаждения 35 °С или для охлаждения САТ до температуры грунта (с дублирующим источником тепла или тепловым насосом).

На рис. 4 приведены расчетные значения продолжительности работы САТ в зависимости от тепловой нагрузки на отопление по отношению к максимальной температуре зарядки для различных значений объема аккумулятора $V_{САТ}$. Максимальная продолжительность работы в режиме напольного отопления составляет 120 суток для $Q_{от}/\Theta = 50$ при объеме аккумулятора $V_{САТ} = 500 \text{ м}^3$ и, соответственно, 220 суток в режиме полной разрядки до температуры грунта. С ростом отопительной нагрузки при ограниченной максимальной температуре нагрева САТ (60-90 °С) продолжительность работы значительно снижается.

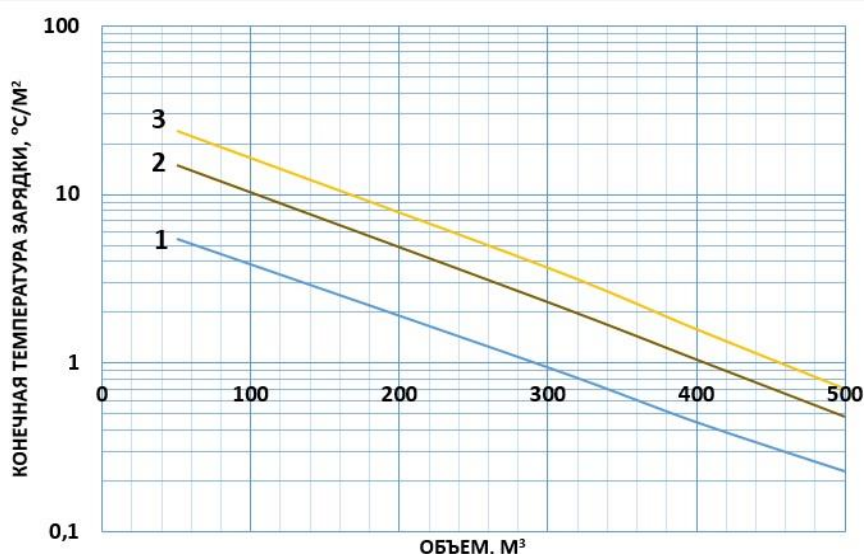


Рис. 3. Конечная температура зарядки САТ в расчете на 1 м² площади солнечного коллектора для условий г. Екатеринбург: 1, 2, 3 – продолжительность зарядки 1, 3 и 6 летних месяцев соответственно

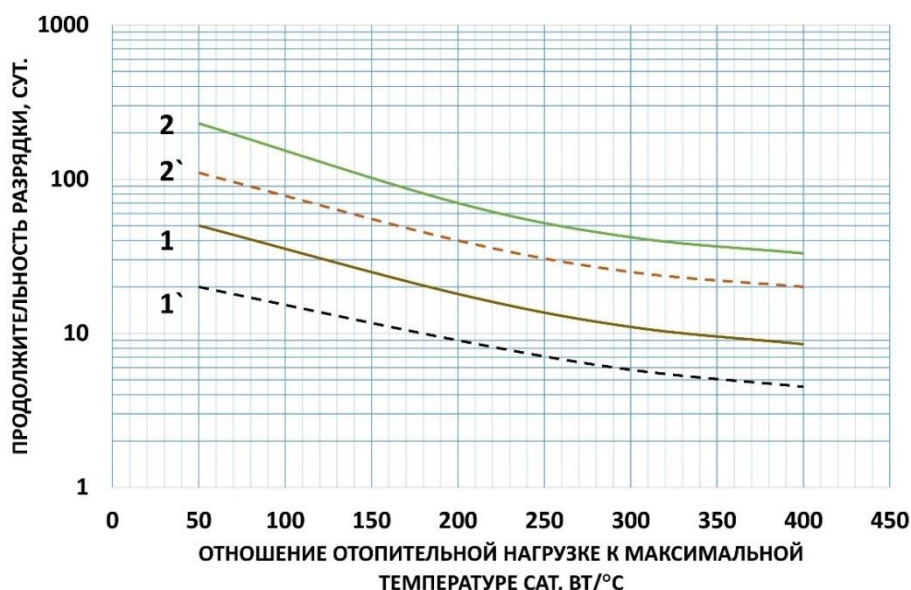


Рис. 4. Продолжительность разрядки САТ в режиме полной разрядки (1, 2) и в режиме отопления «теплый пол» (1', 2') при объеме САТ 100 м³ и 500 м³

Предложенная методика расчета гелиосистемы с сезонными аккумуляторами теплоты позволяет оценить необходимую площадь СК, температурные режимы зарядки и разрядки САТ вместе с основными геометрическими параметрами системы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Высочин В.В. Математическая модель гелиосистемы с сезонным аккумулятором тепла / Труды Одесского политехнического университета, Одесса, 2011, вып. 2 (36), с. 125–129.
2. Высочин В.В. Влияние размеров сезонного аккумулятора тепла на автономность работы гелиосистемы / Труды Одесского политехнического университета, Одесса, 2012, вып. 1 (36), с. 129–132.
3. Бекман Б., Гилли П. Тепловое аккумулирование энергии / Пер. с англ. изд. Мир, 1987, – 272 с.
4. Пехович А.И., Жидких В.М. Расчет теплового режима твердых тел / Л.: Энергия, 1976. – 352 с.
5. Кешуов С.А., Алдибеков И.Т., Жакишева М.Т. Исследования солнечного водонагревателя с вакуумным трубчатым коллектором / Тр. Казахского НИИ механизации и электрификации сельского хозяйства, Алматы, 2014, с. 1–8.

УДК 621.321

А. С. Седов, А. С. Колпаков

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия

ДЕАЭРАЦИОННАЯ УСТАНОВКА НА ОСНОВЕ ВИХРЕВОГО ЦИКЛОНА-ДЕГАЗАТОРА. КОНСТРУКЦИЯ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ

В работе повествуется о вихревом способе деаэрации воды. Рассмотрены основы центробежно-вихревого метода деаэрации, описывается схема комбинированного использования термической и вихревой деаэрации. Приводятся результаты опытных исследований с построенных виртуально циклонах-дегазаторах, а также с существующих промышленных деаэрационных установок.

Ключевые слова: центробежно-вихревой деаэратор; деаэрационная установка; гидроциклон; деаэрация; вихревой поток; коррозионно-активные газы; дегазатор; интенсификация процесса деаэрации.

A. S. Sedov, A. S. Kolpakov

Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

DEAERATION UNIT BASED ON THE VORTEX CYCLONE DEGASSER. DESIGN AND EFFICIENCY

The work considers the vortex method of deaeration of water. Fundamentals of centrifugal vortex method of deaeration are considered, the scheme of combined use of heat and swirl deaeration is described. The results of experimental studies of virtually built cyclone degasser and existing industrial deaeration installations are given.

Key words: centrifugal-vortex degasser; deaeration installation; hydrocyclone; deaeration; vortex flow; corrosive gases; degasser; intensification of the process of de-aeration.

ВВЕДЕНИЕ

Кислород является основной причиной коррозии трубопроводов тепловых сетей [1], причем его агрессивность увеличивается с температурой в соответствии с расчетным температурным графиком.

Затраты на деаэрацию за эксплуатационный период намного меньше затрат на замену аварийных трубопроводов. Известно, что при использовании недеаэрированной воды, срок службы стальных трубопроводов вследствие внутренней коррозии составляет не более 5-7 лет, т.е., по крайней мере, в два-три раза меньше нормативных показателей. Таким образом, деаэрация подпиточной воды тепловых сетей является одним из ключевых элементов обеспечения безопасной эксплуатации за счет выполнения требований к водно-химическому режиму системы теплоснабжения [2].

В настоящее время в теплоэнергетике применяется, в основном, термическая деаэрация, иногда в сочетании с химической деаэрацией. Оба вида подготовки воды, особенно химическая деаэрация, относятся к достаточно затратным методам и требуют немалого времени пребывания воды в зоне обработки.

Снижение затрат и интенсификация процесса водоподготовки могут быть достигнуты за счет многоступенчатого процесса, включающего предварительную дегазацию воды в закрученном потоке.

ЦЕНТРОБЕЖНО-ВИХРЕВОЙ ДЕАЭРАТОР

При закрутке потока в неинерциальной системе отсчета на каждый элемент вращающейся жидкости помимо силы тяжести действует центробежная сила, направленная радиально от оси вращения и лежащая в

нормальной по отношению к оси плоскости. Результирующая этих сил направлена от оси вращения под небольшим углом к её нормали.

В приосевой области любого типа вихревых устройств формируется зона пониженного давления [3], что позволяет использовать эти устройства, например, в качестве вакуум-насосов [4].

На погруженные во вращающуюся жидкость тела, к которым можно отнести и микропузырьки воздуха и пара, действует архимедова сила, численно равная весу вытесненной жидкости и противоположная по направлению результирующей силе. При условии, что в этом поле сил вес тела легче веса вытесненной воды, архимедова сила вызовет перемещение такого тела к оси вращения. В результате становится возможной центробежная дегазация воды, когда микропузырьки устремляются из периферийных участков вихревого устройства в его центральную область с низким давлением, где образуется парогазовая воронка.

Закручивание потока приводит к снижению количества растворенных в объеме жидкости коррозионно-опасных газов O_2 и CO_2 , что улучшает потребительские свойства воды для последующей обработки термическим или химическим методами.

Примером достаточно простого устройства для такой обработки воды может быть циклон-дегазатор [5], в котором пикнометрическим методом оценивалось изменение содержания газов в закрученном потоке воды по высоте устройства.

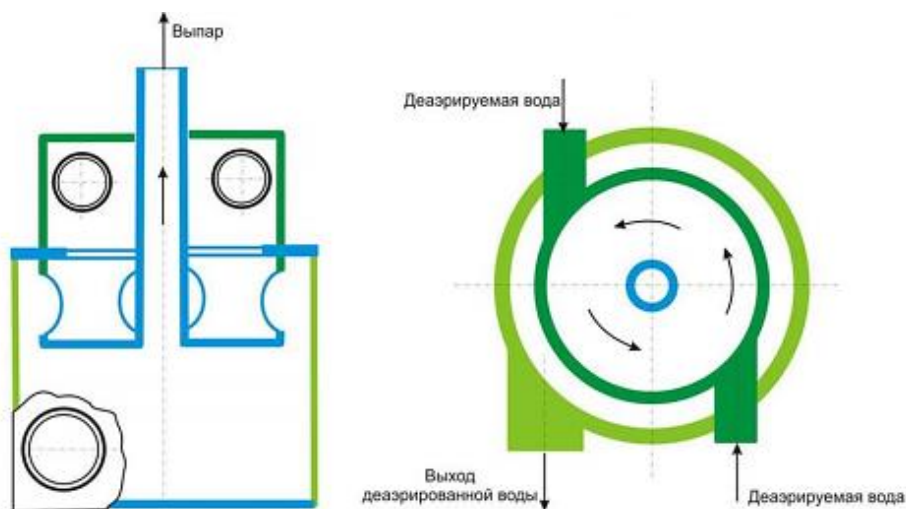


Рис. 1. Конструктивная схема центробежно-вихревого деаэратора [6]

ДЕАЭРАЦИОННАЯ УСТАНОВКА

Применение центробежных устройств, предположительно, улучшит и показатели термических деаэраторов за счет сокращения времени деаэрации. Так, в деаэрационной установке (рис. 1.), комбинирующей в себе работу центробежно-вихревого деаэратора ДЦВ и термического капельного деаэрационного устройства КД, деаэрируемая вода подается насосом из промежуточного атмосферного бака в первую ступень деаэрации через смешивающий пароводяной подогреватель и регулятор расхода в ДЦВ, где происходит завихрение и вскипание потока.

Прирост плотности воды составил:

- в нижней части циклона-дегазатора 6,038 %;
- в средней – 5,93 %;
- в верхней – 1,004 %.

Таким образом, после вихревой обработки жидкости каждая из проб воды оказалась менее газонасыщенной (более плотной), чем исходная вода. При этом отмечено усиление эффекта дегазации с ростом избыточного давления в интервале $1\div 5$ кгс/см² с уменьшением доли воздуха в удаляемой через нижний слив жидкости.

По оценкам [6] около 90 % воздуха, содержащегося в подаваемой воде, выносится через верхний слив и только 10 % – через нижний, что свидетельствует о достаточно высокой эффективности метода.

Снижение содержания растворенного воздуха до 90 % от начального значения обычно делает экономически оправданной химическую деаэрацию при приготовлении подпиточной воды обработкой реагентом, например, JurbySoft 12.

Применение обработанной в циклоне-дегазаторе воды для подпитки системы ГВС, где деаэрация не предусмотрена нормативными документами [1], безусловно, скажется на увеличении сроков эксплуатации трубопроводов. Это направление работы уже нашло отражение в ряде проектов водогрейных котельных, где использован центробежный дегазатор, удаляющий воздух из подогретой до 75°C воды для нужд ГВС.

Обычно считается, что перегретая жидкость, прижатая центробежной силой к стенкам ДЦВ, на входе в центробежно-вихревую зону практически мгновенно вскипает, и образовавшиеся в рабочем объеме ступени пузырьки газа начинают интенсивно перемещаться в радиальном направлении к центру, где через выпарную трубу отсасываются эжектором в контактный охладитель. Далее частично деаэрированная вода поступает на вторую ступень деаэрации в капельный деаэратор в паровом пространстве деаэрационного бака, находящегося под вакуумом, для финишной обработки воды при её диспергировании.

Эксперименты на опытно-промышленных установках показали [6], что массовая концентрация растворённого кислорода в деаэрированной воде практически во всем диапазоне нагрузок и температуры исходной воды не превосходит нормативного значения (50 мкг/кг). При этом отмечено увеличение производительности установки за счет ДЦВ, что может быть объяснено малым временем пребывания воды в первой ступени.

Последовательное включение ДЦВ и термической деаэрации отразится на продлении сроков эксплуатации трубопроводов, котельного оборудования, а также на качестве воды.

Деаэрационные установки являются достаточно крупными объектами, и проведение экспериментов на них сопряжено с немалыми затратами. По этой причине, опираясь на экспериментальные данные, целесообразно проводить численный эксперимент, например, используя программные возможности пакета ANSYS.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. СП 124.13330.2012 Тепловые сети.
2. ФНП «Правила промышленной безопасности опасных производственных объектов, на которых используется оборудование, работающее под избыточным давлением» (утв. Приказом Ростехнадзора от 25 марта 2014 г. № 116).
3. Алексеенко С.В., Куйбин П.А., Окулов В.Л. Введение в теорию концентрированных вихрей. Новосибирск: Институт теплофизики СО РАН, 2003.
4. Меркулов П.М. Вихревой эффект и его применение. М.: Машиностроение, 1969.
5. Филер З.Е., Кусакин Ю.А. Интенсификация виброуплотнения бетонных смесей при использовании дегазированной воды. / Тезисы докладов IV Всесоюз. симпозиума «Реология бетонных смесей и ее технологические задачи». Юрмала, РПИ, 198
6. Росляков А.Н. Расчетно-экспериментальное исследование десорбции растворенного кислорода в центробежно-вихревом деаэраторе. Дисс. канд. техн. наук. Иваново, 2015.

УДК 621.3

И. В. Яковлев, А. И. Попов

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ СБРОСОВ НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПОТРЕБНОСТИ ГОРОДА

В работе оценены теплоэнергетические параметры стоков наиболее крупных южных очистных сооружений города Екатеринбурга. Температура сточных вод ниже температуры наружного воздуха в летнее время и выше в зимнее, что делает их идеальным источником низкопотенциального тепла для использования в тепловых насосах. Суммарная тепловая потребность объектов ЮАС определена в 13 416 Гкал, что составляет примерно только сотую часть от всей низкопотенциальной тепловой энергии стоков, что позволяет ее основной объем направить на теплоснабжение энергодефицитных районов.

Ключевые слова: дополнительные энергетические ресурсы; тепловые сбросы; низкопотенциальное тепло; тепловые насосы; сточные воды.

I. V. Yakovlev, A. I. Popov

Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

THE USE OF WASTE HEAT FOR THE CITY POWER SUPPLY

The estimation of flows thermal power characteristics was made for the largest wastewater treatment plant of Yekaterinburg city south. The wastewater temperature is below the ambient air temperature in summer and is higher in winter, which makes the wastewater an ideal low potential heat source for heat pumps. Total heat demand of SAS objects is defined in 13 416 Gcals, which is only about a hundredth part of total low potential waste heat energy. This allows to send its main part to the heating of the energy deficient regions.

Key words: additional energy resources; thermal discharges; low potential heat; heat pumps; wastewater.

ВВЕДЕНИЕ

Свердловская область имеет мощную машиностроительную и металлургическую индустрию, но испытывает одновременно дефицит органических ископаемых, импортируя ежегодно газ, нефть, каменный уголь в объеме 39...40 млн т.у.т. Актуальным в этой

связи является поиск местных дополнительных энергетических ресурсов, каковыми могут являться возобновляемые источники энергии, в частности, тепловые сбросы от крупных промышленных объектов и от канализационных сбросов городов.

Для примера, в работе студента кафедры «Атомные станции и возобновляемые источники энергии» Яковлева И. В. были оценены теплоэнергетические параметры стоков наиболее крупных южных очистных сооружений города Екатеринбурга.

Температура сточных вод ниже температуры наружного воздуха в летнее время и выше в зимнее, что делает их идеальным источником низкопотенциального тепла для использования в тепловых насосах.

Внедрению тепловых энергосберегающих систем на раннем этапе способствует целый ряд факторов, в т. ч.:

- отсутствие резерва централизованных систем теплоснабжения;
- рост тарифов на энергоснабжение;
- освоение новых строительных площадок, удаленных от централизованного энергоснабжения;
- значительный износ основного действующего оборудования ТЭЦ, котельных и протяженных трубопроводов.

В работе рассматривались две задачи: минимальная – обеспечение работы систем отопления, вентиляции и ГВС только объектов самих станций; и максимальная – оценка всего теплоэнергетического потенциала стоков, который целесообразно передать в централизованные сети городов.

ОЦЕНКА ПОТЕНЦИАЛА СТОКОВ

Система канализации в городе Екатеринбурге – производственно-бытовая, принимающая сточные воды от населения и от промышленных предприятий.

Схема канализования по условиям рельефа и планировочным факторам – зонная. Южная аэрационная станция (ЮАС) обеспечивает сбор, транспортировку и очистку 85 % стоков города.

Сточные воды подвергаются механической, биологической очистке, обеззараживанию и сбрасываются в бассейн реки Исеть.

В настоящее время тепловую энергию объекты ЮАС получают от котельной завода ОАО «УралХиммаш». Суммарная тепловая нагрузка этих объектов составляет 13 416 Гкал/год и распределяется между отоплением, ГВС и вентиляцией в соответствии с диаграммой на рис. 1.

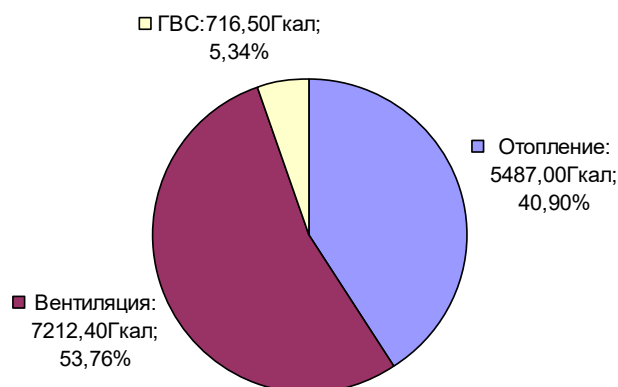


Рис. 1. Тепловая нагрузка объектов ЮАС

Для оценки низкопотенциальной тепловой энергии, которую содержат стоки, были проанализированы их месячные объемы и средняя температура воды.

Графическое изображение объемов поступления стоков в сутки по месяцам представлено на рис. 2. Статистические данные за несколько последних лет разнятся незначительно. Средние объемы очищенных стоков по месяцам после хлорирования представлен на рис. 3.

Для определения температурного градиента Δt , используемого для оценки количества низкотемпературного тепла, необходимо определить возможность снижения температуры сточных вод до температуры вод реки Исеть. Данный градиент составил для летних месяцев 5...7 °С, для зимних – 9...10 °С.

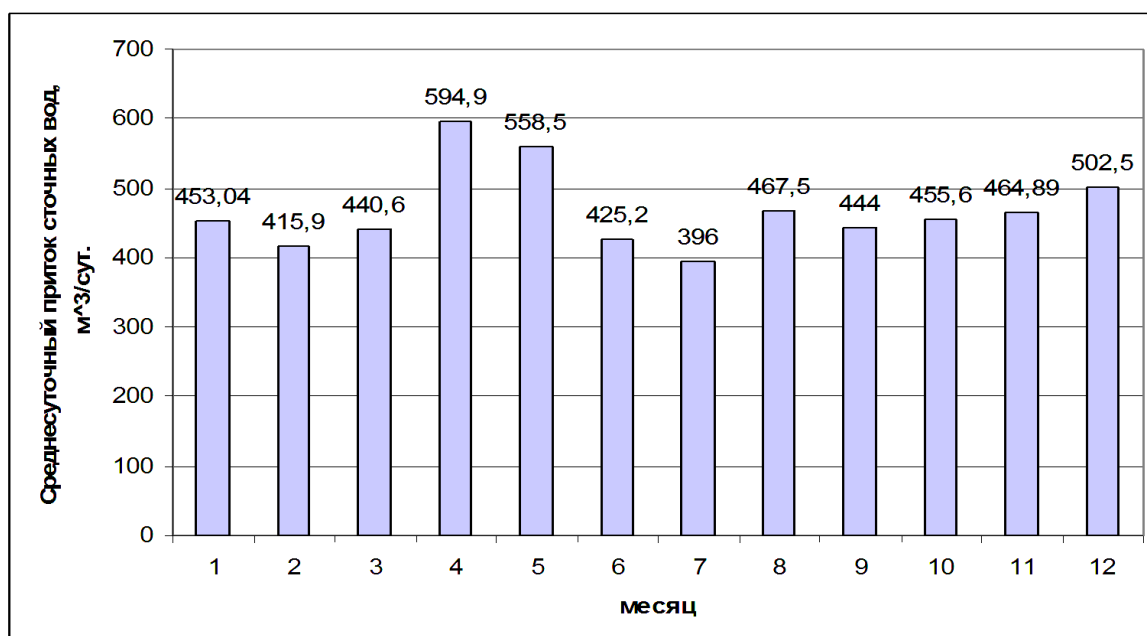


Рис. 2. Объем поступления стоков в сутки по месяцам

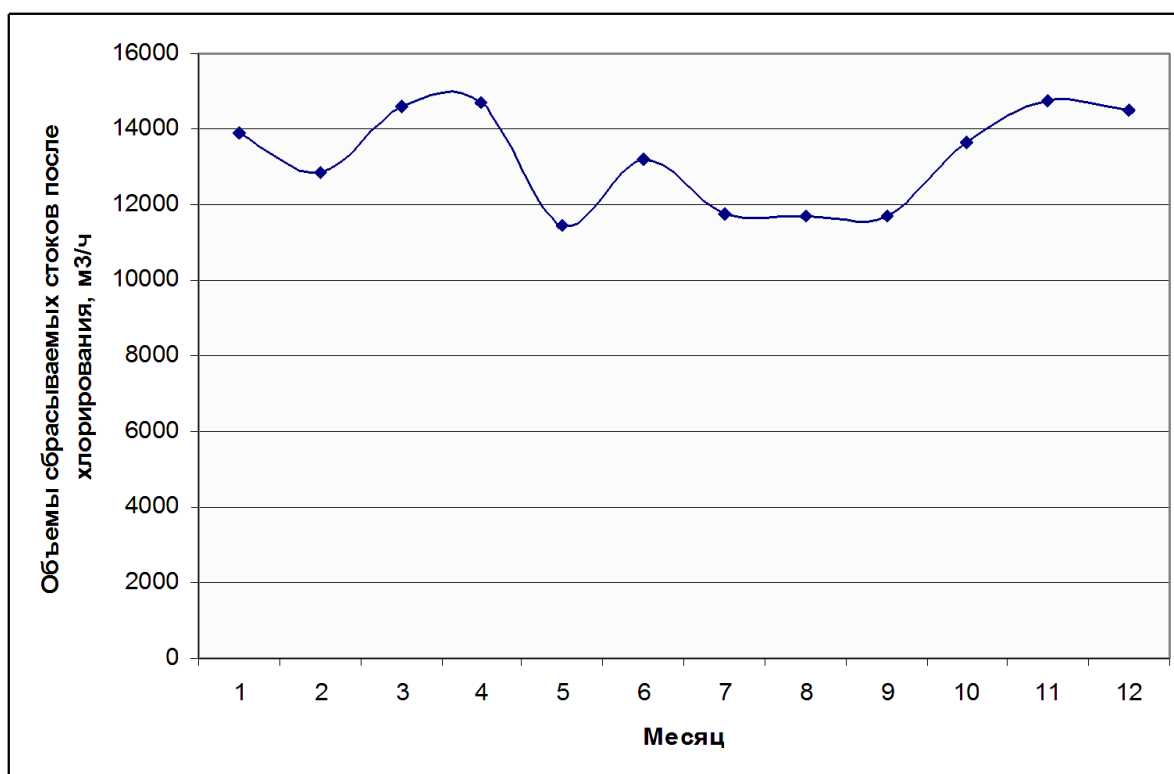


Рис. 3. Средние объемы очищенных стоков по месяцам

Количество низкотемпературной теплоты, которую возможно получить при использовании потенциала сточных вод определяется по формуле

$$Q = G \cdot \Delta t \cdot C, \quad (1)$$

где Q – количество теплоты, кВт·ч; G – расход стоков, кг/ч; Δt – градиент температуры, °С; $C = 4,19$ кДж/(кг·°С) – теплоемкость воды.

Далее был рассчитан потенциал стоков для каждого месяца, который составлял для летних месяцев в среднем 64 000...86 000 Гкал/мес, для зимних – 140 000...155 000 Гкал/мес, а суммарный годовой тепловой потенциал определен в количестве 1 392 192 Гкал/год.

ВЫВОДЫ

Ранее указывалось, что суммарная тепловая потребность объектов ЮАС определена в 13 416 Гкал, что составляет примерно только сотую часть от всей низкотемпературной тепловой энергии стоков, что позволяет ее основной объем направить на теплоснабжение энергодефицитного Чкаловского района города Екатеринбурга.

Для обеспечения собственной теплоэнергетической потребности ЮАС рекомендован проект с установкой двух тепловых насосов марки ТН-3000, производства

ЗАО «Энергия», причем один из них находится в резерве или включается в работу в период аномальных похолоданий. Период окупаемости этого проекта определен с учетом льготного тарифа на электроэнергию, предоставляемому для энергосберегающих проектов, в 5 лет.

Для использования избыточной низкопотенциальной тепловой энергии, которую целесообразно передавать городу, рекомендуется использовать тепловые установки, разработанные в НПО «ЭКиП». Данные установки работают на диоксиде углерода (R744). Тепловые насосы на R744 могут иметь мощность 50 МВт и более в одном агрегате и обеспечивать температуру на выходе до 90 °С.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. СНиП 2.34-76 Горячее водоснабжение.
2. СанПин 2.2.4.548-96 «Санитарные нормы микроклимата производственных помещений».
3. ГОСТ 12.1.005.88 Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей среды.
4. Попель О.С. Тепловые насосы – эффективный путь энергосбережения // Проблемы энергосбережения. №1. 1999.

УДК 662.76

*П. А. Ральников, Н. А. Абаимов, А. Ф. Рыжков*²⁶

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина,
г. Екатеринбург, Россия

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЧИСЛЕННЫХ МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ СРАВНИТЕЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ РАБОТЫ ПИЛОТНЫХ ПОТОЧНЫХ ГАЗИФИКАТОРОВ

В работе рассмотрена одна из технологий энерго- и ресурсосбережения в угольной энергетике, а именно поточная газификация твёрдого топлива в газификаторе – ключевом элементе парогазовой установки с внутрицикловой газификацией. В докладе сравниваются аэродинамические особенности работы двух пилотных одноступенчатых кислородных газификаторов под давлением с сухой топливоподачей пылевидного твёрдого топлива. Одна из этих установок разработана концерном Siemens, а вторая НПО ЦКТИ. Численное моделирование работы агрегатов проведено с использованием метода вычислительной гидродинамики CFD. Для сокращения времени расчёта геометрия исследуемых газификаторов была упрощена до сегментов в 5 и 45 градусов, соответственно. Произведено исследование расчетной сетки для газификатора Siemens. Сравнение расчётных результатов показало влияние относительных длин камер газификации на расположения аэродинамических структур.

Ключевые слова: газификация; вычислительная гидродинамика; твёрдое топливо; кислородное дутье; поточный газификатор.

P. A. Ralnikov, N. A. Abaimov, A. F. Ryzhkov

Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

THE USE OF NUMERICAL SIMULATION METHODS FOR A COMPARATIVE STUDY OF THE PILOT FLOW GASIFIERS AERODYNAMIC CHARACTERISTICS

One of the energy technologies and resource saving in coal-based energy considered in this work. Namely, flow gasifier, as a key element of combined-cycle plants with nutriciology gasification. In the report the aerodynamic features of the two pilot single-stage pressurized oxygen-blown dry-feed pulverized solid fuels gasifier are compared. One of these units developed by concern Siemens, and the second - NPO CKTI. Numerical modeling of the units carried out using computational fluid dynamics (CFD) method. Simplified segments gasifiers geometries of 5 and 45 degrees, respectively, are studied to reduce the calculation time. The study was conducted of the computational grid for the Siemens gasifier. Comparison of the calculated results showed the influence of the gasification chamber relative lengths on the aerodynamic structures location.

Keywords: gasification; CFD; solid fuel; oxygen-blowing; entrained-flow gasifier.

ВВЕДЕНИЕ

Интенсификация различных энергетических процессов – одно из наиболее важных направлений развития современной энергетики, в связи с чем широкое распространение получают технологии, направленные на повышение КПД и снижение вредных выбросов. Одной из наиболее перспективных энергетических схем является парогазовая установка с внутрицикловой газификацией (ПГУ-ВЦГ) угля. Наиболее важный узел данной установки – поточный газификатор, в котором происходит конверсия пылеугольной смеси в горючий синтез-газ.

Для создания высокоэффективного поточного газификатора перспективной высокоомощной ПГУ-ВЦГ необходимы не только экспериментальные, но и численные исследования. Именно поэтому в течение последних нескольких десятилетий физические

экспериментальные исследования активно подкрепляются математическими методами моделирования, из которых наиболее функциональным считается метод вычислительной гидродинамики (Computational Fluid Dynamics) – CFD.

Одним из мировых лидеров в сегменте поточной газификации является корпорация Siemens, разработавшая в пилотном и коммерческом вариантах поточный одностадийный кислородный газификатор под давлением с сухой топливоподачей [1]. Исследованием аналогичного газификатора занимаются отечественные энергетики из НПО ЦКТИ на примере собственной пилотной установки [2]. Понимание сходства и различия аэродинамических особенностей работы установок позволит нам сделать выводы об области применения и возможности использования экспериментальных данных, получаемых с газификатора ЦКТИ, имеющегося в доступности для проведения экспериментов.

Цель работы – сравнение аэродинамических особенностей движения газа в пилотных одноступенчатых поточных газификаторах с использованием CFD-метода.

Для достижения цели необходимо решить ряд задач:

- 1) создать CFD модель, включающую в себя все необходимые подмодели;
- 2) произвести численное моделирование установок;
- 3) провести исследование расчетной сетки на примере наименее изученной нами зарубежной установки;
- 4) проанализировать работу экспериментальных установок на основе полученных расчётных данных.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ

Газификаторы Siemens (рис. 1) и ЦКТИ (рис. 2) представляют собой вертикально расположенные сосуды, габаритные размеры которых представлены в таблице 1 [3]. В обеих установках в верхней половине расположена камера газификации, а в нижней – камера охлаждения. Принципиально газификаторы отличаются только тем, что газификатор Siemens на выходе из камеры газификации имеет конфузочно-диффузорный пережим, а в ЦКТИ части соединены друг с другом водоохлаждаемым кольцом и не имеют пережимов. Параметры газификаторов представлены в таблице 1.

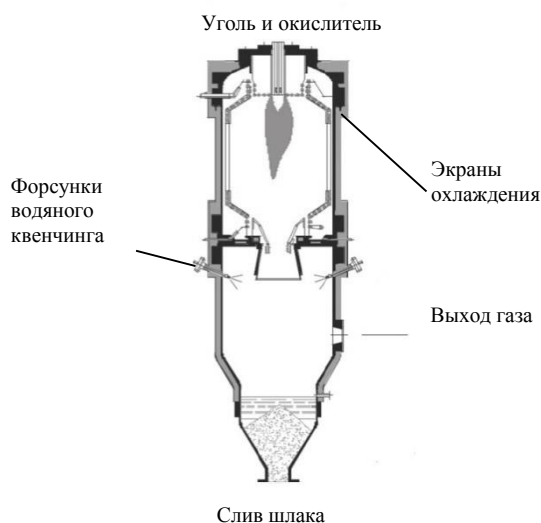


Рис. 1. Пилотный газификатор Siemens

ПРОЦЕСС МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для расчета скоростных параметров движения потока внутри газификаторов использовалась модель турбулентности k - ϵ стандартного вида. Выбор данной модели был обусловлен характером движения рабочей среды. Для оптимизации вычислительного процесса расчетное моделирование установок Siemens и ЦКТИ производилось не во всем смоделированном объеме установок, а на сегментах в 5 и 45 градусов, соответственно. Геометрия газификатора ЦКТИ обладает лучевой симметрией (45°) из-за восьми отверстий выхода окислителя в форсунке горелки. Расчетная сетка данного сегмента состояла из

1,7 млн элементов. В случае с зарубежной установкой достаточно сегмента в 5° .

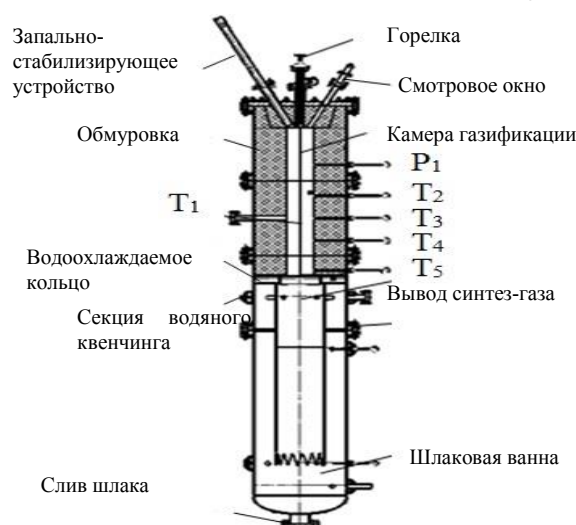


Рис. 2. Пилотный газификатор НПО ЦКТИ

Таблица 1
Параметры установок поточной газификации
твердого топлива

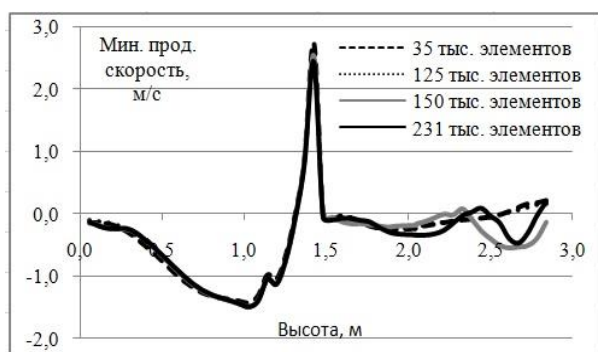
Параметр	Siemens	ЦКТИ
Диаметр, м	0,6	0,21
Длина, м	2,8	1,6
Расход топлива, кг/ч	400	12
Состав транспортирующего агента	Азот	Азот
Расход транспортирующего агента, кг/с	0,04165	0,0001736
Состав дутья, об. %	O ₂ = 80 N ₂ = 20	O ₂ = 96 N ₂ = 4
Рабочее давление, МПа	2	0,32
Мощность, кВт	5000	30-160

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСЧЕТНОЙ СЕТКИ

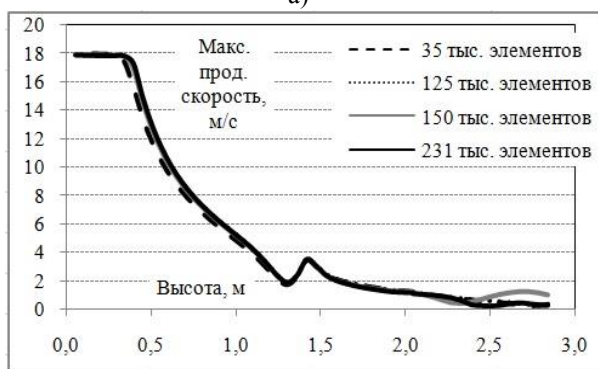
Поскольку моделирование установки Siemens производится нами впервые, для гарантирования точного и достоверного результата было решено произвести исследование влияния количества расчетных элементов сетки на параметры гидродинамики. Были произведены расчеты с использованием сеток, содержащих 35 тыс., 125 тыс., 150 тыс., и 231 тыс. расчётных элементов. Ограничение в 231 тыс. элементов обосновано вычислительными возможностями используемой ЭВМ. Для наглядного и точного сравнительного исследования построены графики зависимости продольной скорости от высоты газификатора для расчетных сеток с различным количеством элементов (рис. 3).

На удалении 1,6 метра от горелки практически нет отличий в результатах, полученных на всех сетках. Что касается оставшегося участка, то в обоих случаях наблюдается стабилизация значений с повышением количества расчетных элементов в сетке. Таким образом, очевидна необходимость выполнения дальнейших сравнительных исследований с детальной сеткой с максимальным количеством элементов,

а также дальнейшего исследования на более производительных ЭВМ с более детальными сетками.



а)



б)

Рис. 3. Зависимость минимальной (а) и максимальной (б) продольной скорости от высоты газификатора Siemens

РЕЗУЛЬТАТЫ СРАВНИТЕЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

На рис. 4 и 5 представлены результаты расчетов, необходимые для сравнительного анализа гидродинамических особенностей работы данных установок.

Из рисунков 4а и 5а видно, что в газификаторе Siemens область высокоскоростного околоосевого течения заканчивается почти на середине камеры газификации, а в случае с ЦКТИ эта область распространена только на трети длины камеры газификации. Одним из наиболее важных факторов при сравнительном анализе установок является значение пиковых скоростей. В данном случае они равняются 202 м/с в зарубежном и 212 м/с в отечественном газификаторе. Этот факт свидетельствует о сходстве исследуемых установок.

Распределение обратных токов в данных установках продемонстрировано на рисунках 4б и 5б. В газификаторе Siemens обратные токи распределены по всей высоте камеры газификации, а в ЦКТИ только по третьей части длины. Газификатор Siemens имеет пережим между камерами газификации и охлаждения, по этой причине в данной установке зоны обратных токов возникают и в камере охлаждения. В случае с камерой охлаждения ЦКТИ, обратные токи появляются только в местах внезапных расширений.

Если рассматривать линии тока газовой фазы (рис. 4в и 5в), то в обоих газификаторах наблюдается

резкое падение скорости от максимальных значений до умеренных величин.

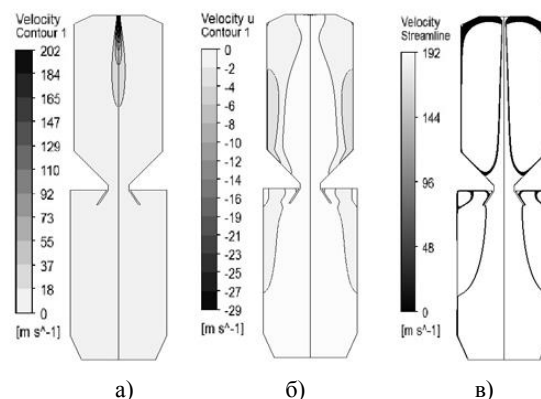


Рис. 4. Результаты моделирования газификатора Siemens: а) абсолютная скорость; б) скорость возвратных токов; в) линии тока газов

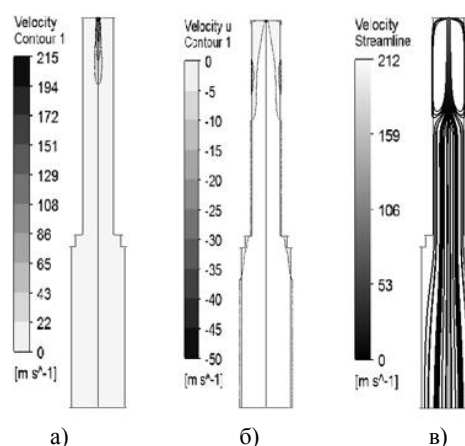


Рис. 5. Результаты моделирования газификатора ЦКТИ: а) абсолютная скорость; б) скорость возвратных токов; в) линии тока газов

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе сравнения расчетной гидродинамики данных установок можно выделить основные различия их в работе, которыми являются относительные длины областей обратных токов, а также характер возвратных течений в камерах охлаждения. Основные параметры работы совпадают, что говорит о возможности проведения сравнительного анализа экспериментальных данных по газификации углей в этих установках.

В дальнейшем запланировано моделирование работы установок с учётом процесса газификации твёрдого топлива.

Исследование выполнено в Уральском федеральном университете за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-19-00524).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. San Shwe Hla, Daniel G. Roberts, David J. Harris. A numerical model for understanding the behaviour of coals in an entrained-flow gasifier // Fuel Processing Technology. 2015. № 134. С. 424–440.

2. Абаимов Н.А., Шурчалин А.А., Шестаков Н.С., Осипов П.В., Рыжков А.Ф. Экспериментальное и численное исследование поточной газификации угля при повышенном давлении и различных составах дутья // Материалы IX Всероссийской конференции с международным участием Горение топлива: теория, эксперимент, приложения (16–18

ноября 2015 г.) / Институт теплофизики СО РАН, г. Новосибирск. 2015. Электронное издание.

3. Michele Vascellari, Daniel G. Roberts, San Shwe Hla, David J. Harris, Christian Hasse. From laboratory-scale experiments to industrial-scale CFD simulations of entrained flow coal gasification // Fuel. 2015. №152. С. 58–73.

УДК 536.2; 621.1

Ю. Р. Гильметдинова, Л. А. Шмакова, Е. В. Микула²⁷

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия

К ВОПРОСУ О КОНЦЕПЦИИ ТЕПЛООБМЕННОГО ЭЛЕМЕНТА КОНВЕКТИВНОГО ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО НАГРЕВАТЕЛЯ КОМПРИМИРОВАННОГО ВОЗДУХА

Рассмотрен способ интенсификации теплообмена, при рекуперативном нагреве воздуха до температур порядка 800–1000 °С. Проанализировано влияние на процесс теплообмена высоты и толщины продольного ребра, а также их стоимостные показатели. Выбрана оптимальная конструкция теплообменного элемента для дальнейшей проработки.

Ключевые слова: воздух; рекуперативный нагрев; высокотемпературный воздушнонагреватель; интенсификация теплообмена; гибридная схема ПГУ.

J. R. Gilmetdinova, L. A. Shmakova, E. V. Mikula

Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

THE QUESTION OF HEAT EXCHANGE ELEMENT CONCEPTS OF CONVECTION HIGH TEMPERATURE HEATER OF COMPRESSED AIR

The method of heat transfer enhancement in regenerative air heating to the temperatures of about 800–1000 °C was considered. The influence of the longitudinal fins height and thickness on the heat transfer was analyzed, as well as their cost parameters. The optimum design of the heat exchanger element was selected for further development.

Key words: air; recuperative heating; high-temperature air heater; heat exchange intensification; combined-cycle power unit.

Сокращение запасов природного газа и нефти, а также достаточно высокая цена на эти энергоресурсы все больше подогревает интерес к использованию твердых топлив в энергетике. В связи с этим уже продолжительное время на базе Уральского федерального университета ведутся исследования гибридной ПГУ-ВЦГ с внешним сжиганием твердых топлив.

В схеме гибридной ПГУ-ВЦГ с внешним сжиганием топлива на основе процессов термообработки угля и «внешнего» сжигания топлива одним из ключевых элементов является высокотемпературный воздушнонагреватель, в нем нагревается сжатый воздух (до 750–1000 °С), направляемый затем в камеру сгорания газовой турбины.

Давление нагреваемого воздуха в воздушном котле определяется давлением в камере сгорания газовой турбины и в газогенераторе. Для современных энергетических турбин оно составляет порядка 2–3 МПа,

давление дутьевого воздуха в газогенераторе 3–4 МПа.

Для описания интенсивности теплообмена к воздуху в трубном металлическом элементе при турбулентном режиме течения используется известная критериальная зависимость [1]:

$$\overline{Nu}_{дж} = 0,021 Re_{дж}^{0,80} Pr_{ж}^{0,43} (Pr_{ж} / Pr_c)^{0,25} \quad (1)$$

Очевидно, что коэффициент теплоотдачи зависит от $\lambda^{0,57}$, $c_p^{0,43}$, $\mu^{-0,37}$, $d_{ж}^{-0,2}$, $w^{0,8}$, $\sim p^{0,8}$ и $\sim T^{-0,53}$.

Задавшись пределами изменения основных параметров, влияющих на теплообмен, мы оценили диапазон вариации коэффициента теплоотдачи со стороны воздуха (рис. 1). На рисунке:

1 – расчет по ф. (1) для $w = 25$ м/с, $t = 400$ °С, $d = 10$ мм;

2 – расчет по ф. (1) для $w = 10$ м/с, $t = 1000$ °С, $d = 40$ мм;

3 – коэффициент теплоотдачи от продуктов сгорания к коридорному трубному пучку для $t = 1000^\circ\text{C}$, $w = 10 \text{ м/с}$, $d = 10 \text{ мм}$;

4 – эффективный коэффициент теплоотдачи $\alpha_{\text{эф}} = \alpha_{\text{г}} \cdot (F_{\text{ор}}/F_{\text{глад}})$ от продуктов сгорания к шахматному мембранному трубному пучку для $t = 1000^\circ\text{C}$, $w = 10 \text{ м/с}$, $d = 10 \text{ мм}$.

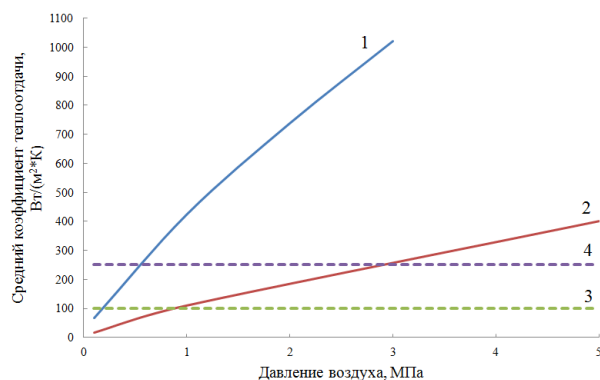


Рис. 1. Зависимость среднего коэффициента теплоотдачи конвекцией от давления воздуха

Как видно из рис. 1, коэффициент теплоотдачи с изменением параметров теплообмена меняется в значительных пределах, причем диапазон расширяется с ростом давления. Между тем коэффициент теплоотдачи со стороны продуктов сгорания $\alpha_{\text{г}}$ для поверхностей нагрева в конвективной шахте парового котла на твердом топливе колеблется в узких пределах 50-90 Вт/(м²·К), что на порядок ниже максимально возможного уровня для коэффициента теплоотдачи со стороны воздуха, т. е. эффективность теплопередачи зависит от внешнего термического сопротивления (теплоотдача от газов).

Скорость продуктов сгорания с золовыми частицами не может быть увеличена выше ~10 м/с из-за эрозионного износа поверхностей нагрева [2], поэтому возможными способами снижения внешнего термического сопротивления может быть:

1. Оребрение. В соответствии с [4] рекомендуется использовать только продольное оребрение (мембранные трубные пучки), поэтому коэффициент оребрения ($F_{\text{ор}}/F_{\text{глад}}$) ограничен. Для конструкции мембранного трубного коридорного пучка воздушного котла HIPPS [4] коэффициент оребрения $F_{\text{ор}}/F_{\text{глад}} = 2,3$.

2. Снижение диаметра труб, поверхностей нагрева.

В результате максимальный уровень эффективного коэффициента теплоотдачи от продуктов сгорания $\alpha_{\text{эф}} = \alpha_{\text{г}} \cdot (F_{\text{ор}}/F_{\text{глад}}) = 250 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$ (при шахматном мембранном трубном пучке для $t = 1000^\circ\text{C}$, $w = 10 \text{ м/с}$, $d_{\text{вн}} = 10 \text{ мм}$), что в разы ниже максимально возможного уровня для $\alpha_{\text{в}} \approx 1000 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$ (рис. 1).

Таким образом, при конструировании поверхностей нагрева котла нужно определить оправданные пределы снижения внешнего термического сопротивления за счет оребрения и уменьшения диаметра труб. Если принять в качестве критерия оптимизации кон-

струкции равенство внешнего и внутреннего термических сопротивлений, то могут быть разработаны рекомендации по выбору скорости течения сжатого воздуха.

Наиболее важной задачей при разработке воздушного котла является снижение затрат на дорогостоящий металл. Для решения данной проблемы была предложена конструкция биметаллической трубы с продольным оребрением (рис. 2).

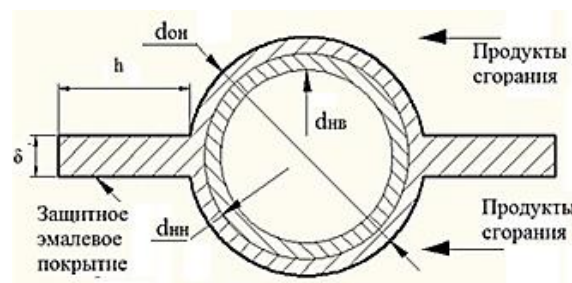


Рис. 2. Конструкция биметаллической трубы с продольным оребрением

Внутренняя труба конструкции выполняется из материала, способного обеспечить прочность конструкции при высокой температуре (например, при температуре стенки 950°C – сплав ХН67ВМТЮ).

Наружная конструкция должна обладать тремя свойствами: жаростойкость (т.е. выдерживать воздействие высокой температуры), при низких механических напряжениях; низкая стоимость (по сравнению с жаропрочным сплавом); пониженное (по сравнению с исходной гладкой трубой) термическое сопротивление теплоотдачи от продуктов сгорания.

По заказу Уральского федерального университета в Уральском институте металлов выполнено исследование (за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-19-00524)) и разработано защитное покрытие для углеродистых сталей, позволяющее использовать такую конструкцию до $\sim 1050^\circ\text{C}$.

Для интенсификации теплопередачи от продуктов сгорания принято продольное оребрение. В результате сформировалась конструкция, представленная на рис. 2.

В качестве критерия оптимизации конструкции биметаллической оребренной трубы был принят минимум удельных денежных затрат (капитальных и эксплуатационных) на передачу одного кВт теплоты:

$$\frac{3}{Q} = ((Z_{\text{ж}} + Z_{\text{ус}})/n + Z_{\text{в}} + Z_{\text{г}})/Q \quad (2)$$

где $Z_{\text{ж}}$ – капитальные затраты на жаропрочную трубу, тыс. руб.; $Z_{\text{ус}}$ – капитальные затраты на оребренную трубу из углеродной стали с жаростойким покрытием, тыс. руб.; n – срок службы теплообменного элемента (принят 12,5 лет или 100 тыс. ч); $Z_{\text{в}}$ – затраты на перекачку сжатого воздуха, тыс. руб./год; $Z_{\text{г}}$ – затраты на перекачку продуктов сгорания, тыс. руб./год; Q – тепловой поток, передаваемый биметаллической оребренной трубой, кВт (на один погонный метр трубы).

Тепловой поток через цилиндрическую оребренную с внешней стороны стенку рассчитывают по формуле:

$$Q_{op} = k_{op} \times (T_z - T_g) \times F_{zлад} \quad (3)$$

где T_g и T_z – температуры продуктов сгорания и воздуха, °C; k_{op} – коэффициент теплопередачи через оребренную стенку, Вт/(м²·K); $F_{злад}$ – площадь гладкой поверхности наружной трубы, м².

Коэффициент теплопередачи через оребренную цилиндрическую стенку можно рассчитать по зависимости [2]:

$$k_{op} = \left(\frac{d_{он}}{\alpha_g d_{нв}} + \frac{d_{он}}{2\lambda_{жс}} \ln \frac{d_{нн}}{d_{нв}} + \frac{d_{он}}{2\lambda_{ус}} \ln \frac{d_{он}}{d_{нн}} + \frac{1}{\alpha_z \eta \phi} \right)^{-1}, \quad (4)$$

где α_v и α_g – коэффициенты теплоотдачи со стороны воздуха и газов, Вт/(м²·K); $\lambda_{жс}$, $\lambda_{ус}$ – коэффициенты теплопроводности жаропрочного и углеродистого металла, Вт/(м·K); η – коэффициент эффективности оребрения; $\phi = F_{op}/F_{злад}$ – коэффициент оребрения; $d_{нв}$, $d_{нн}$ и $d_{он}$ – геометрические размеры, м, согласно рис. 2.

Коэффициент теплоотдачи с воздушной стороны определяется следующим образом:

$$Nu = 0,021 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,38} \quad (5)$$

Коэффициент теплоотдачи с газовой стороны определяется как:

$$\alpha_z = \alpha_{злад} \cdot \left[1 - (1 - \eta) \cdot \frac{F_p}{F_{op}} \right] \quad (6)$$

где $\alpha_{злад}$ – коэффициент теплоотдачи с газовой стороны для гладкой трубы [2], Вт/м²·K; F_p – поверхность ребра, м².

Для ребра постоянного поперечного сечения, согласно [3], коэффициент эффективности оребрения определяется по формуле:

$$\eta = th(mh) / (mh). \quad (7)$$

Параметр m рассчитывается как:

$$m = \sqrt{\frac{2 \cdot \alpha_z}{\lambda_{жс} \cdot \delta}}. \quad (8)$$

По вышеизложенной методике производится расчет труб с параметрами:

- диаметр неообременной трубы – внутренний $d_{нв} = 21$ мм, наружный $d_{нн} = 25$ мм;
- наружный диаметр оребренной трубы – $d_{он} = 29$ мм;
- температура горячей среды – $T_g = 1000$ °C, холодной – $T_z = 300$ °C;
- коэффициент теплопроводности жаропрочного металла – $\lambda_{жс} = 15,6$ Вт/м·K, углеродистой стали – $\lambda_{ус} = 43,3$ Вт/м·K;
- стоимость жаропрочного металла $C_{жс} = 3000$ тыс. руб/т, углеродистого метал – $C_{ус} = 50$ тыс. руб/т.

В расчете варьировались:

- высота ребра (h), при этом с ростом h увеличивались капитальные затраты на оребренную трубу из углеродной стали с жаростойким покрытием ($З_{ус}$) и затраты на перекачку продуктов сгорания ($З_r$);
- скорость воздуха, при этом с ростом скорости воздуха увеличивался тепловой поток Q и возрастали затраты на перекачку сжатого воздуха ($З_v$).

В результате расчетов получены зависимости удельных денежных затрат, которые имеют экстремум в зависимости от h и от скорости воздуха (рис. 3–5).

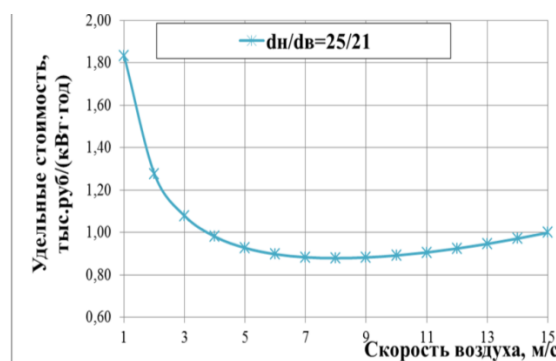


Рис. 3. Зависимость удельных денежных затрат для гладкой трубы ($d_{нн}/d_{нв} = 25$ мм/21 мм) от скорости воздуха

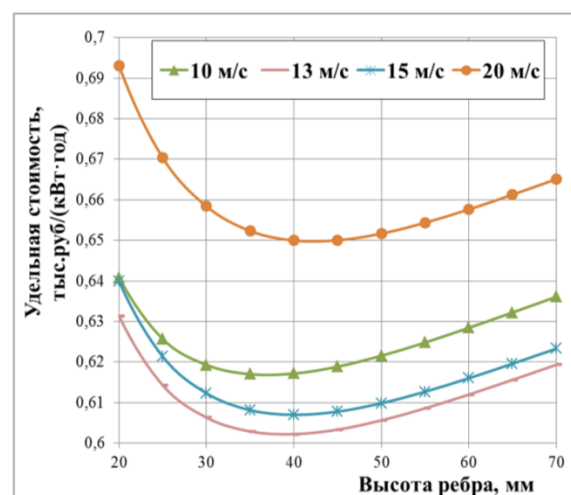


Рис. 4. Зависимость удельных денежных затрат для биметаллической трубы с продольным оребрением от высоты ребра

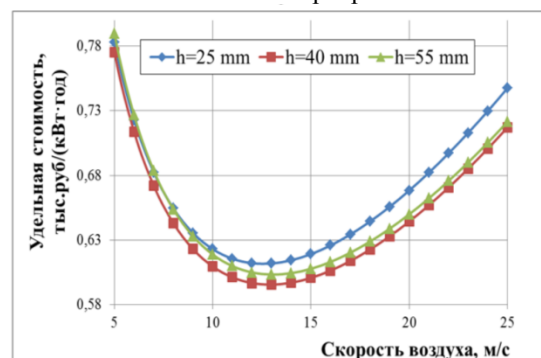


Рис. 5. Зависимость удельных денежных затрат для биметаллической трубы с продольным оребрением от скорости воздуха

Как видно из рис. 4, минимальные удельные денежные затраты для биметаллической трубы с продольным оребрением достигаются при высоте ребра – 40 мм и составляют 0,6 тыс.руб./(кВт·год), что почти в 1,5 раза ниже, чем для гладкой трубы (рис. 3). Для достижения минимума удельных денежных затрат скорость воздуха должна быть 13 м/с (рис. 5).

Исследование выполнено в Уральском федеральном университете за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-19-00524).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. М.: Энергоиздат, 1981.
2. Тепловой расчет котлов (Нормативный метод). СПб.: изд-во НПО ЦКТИ, 1998. 255 с.
3. Д. Керн, А. Краус и др. Развитые поверхности теплообмена. М.: изд-во Энергия, 1977. 78-80 с.
4. Combustion 2000: Final Technical Report / United Technologies Research center. – Connecticut. 2001. – 928 p.

УДК 536.4; 66.045.12

Ю. А. Марчкова, В. А. Микула, П. С. Филиппов, Е. В. Микула

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина,
г. Екатеринбург, Россия

К ВОПРОСУ О КОНЦЕПЦИИ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ СИНТЕЗ-ГАЗА ДЛЯ ПГУ С ВЦГ

Были рассмотрены основные концепции охлаждения синтез-газа. Наиболее подробно разобрана концепция конвективного газоохладителя синтез-газа. Проведено моделирование и верификация элемента конвективного газоохладителя в пакете CFD. Рассчитан коэффициент теплоотдачи со стороны синтез-газа.

Ключевые слова: ПГУ-ВЦГ; конвективный газоохладитель; радиоактивный газоохладитель; газоохладитель со спиральными нагревательными поверхностями.

Y. A. Marchkova, V. A. Mikula, P. S. Filippov, E. V. Mikula

Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

THE QUESTION OF THE CONCEPT OF COOLING SYNTHESIS GAS FOR IGCC

The main concepts of synthesis gas cooling are considered. The concept of convective synthesis gas cooler was considered in details. The simulation and verification of the convective gas cooler element in the CFD package was made. The heat transfer coefficient from the synthesis gas side was calculated.

Key words: IGCC; convection gas cooler; radiation gas cooler; gas cooler with spiral heating; gas cooler with spiral heating surfaces.

ВВЕДЕНИЕ

Модернизация угольной генерации на основе современных технологий – одна из важнейших задач российской энергетики. Перспективным путём производства энергии на базе угля представляется развитие парогазовых установок на основе внутрицикловой газификации твёрдого топлива (ПГУ-ВЦГ) [1].

Поскольку потребление угля для выработки электроэнергии будет возрастать во всем мире, требуется высокоэффективное и экономичное использование угля. В условиях непрерывной борьбы за повышение надежности энергосбережения переработка угля в газообразный энергоноситель и сырьё приобретает решающее значение, что ведет к возрождению интереса к газификации угля [2].

Газификация — высокотемпературный процесс взаимодействия углерода топлива с окислителями, проводимый с целью получения горючих газов (H_2 , CO, CH_4). Для повышения эффективности ПГУ-ВЦГ, необходимо использование физической теплоты синтез-газа после газогенератора.

Для использования физической теплоты синтез-газа применяют газоохладитель (ГО) – теплообменник, в котором горячий синтез-газ отдает свою теплоту воде и пару.

На сегодняшний день в российской энергетике ПГУ с ВЦГ не эксплуатируются. В связи с этим нет достаточного опыта конструирования и расчета подобного рода теплообменников. Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод, что выбор принципиальной конструкции ГО и методы его расчета являются актуальными задачами.

КОНЦЕПЦИИ ОХЛАЖДЕНИЯ СИНТЕЗ-ГАЗА

В различных промышленных процессах с использованием поточных газогенераторов используется четыре основных способа охлаждения газа:

- 1) впрыском воды на выходе газогенератора (водяное охлаждение или квенчинг);
- 2) смешением с потоком охлажденного газа на выходе газогенератора (газовое охлаждение);
- 3) поддержанием эндотермической реакции газификации (химическое охлаждение);
- 4) радиационной рекуперацией;
- 5) конвективной рекуперацией.

Устройства (1–3) – смешивающего типа, а (4–5) – поверхностного. Устройство (1) используется преимущественно в технологиях для быстрого и глубокого охлаждения и промывки синтез-газа, где критерий надежности технологии преобладает над тепловой эффективностью. Полученный газ чаще всего предназначается для использования в качестве сырья в последующих технологических цепочках. В энергетике данное устройство находит ограниченное применение, например, для ПГУ с ВЦГ. Для коммерческих энергоблоков такого типа водяной квенчинг является наиболее распространенным, но сопровождается практически полной потерей физической теплоты синтез-газа.

Способы охлаждения (2÷4) используются преимущественно в энергетике. Основное назначение – «снять» высокотемпературную теплоту и пройти критическую температуру фазового перехода и остеклования основной массы жидкокапельного шлакоуноса. Например, в топке парового энергетического котла используются экранные поверхности (4), ступенчатое сжигание топлива (3), газовое регулирование температуры пара (рециркуляцией продуктов сгорания) (2).

Не менее важным для (3) является решение задачи повышения термохимической эффективности процесса газификации, при которой повышается доля химически связанной энергии, направляемой с синтез-газом в верхний (газотурбинный) цикл ПГУ.

Устройства типа (5) используются при температурах синтез-газа ниже температуры затвердевания шлака, т. е. после (2÷4). Как энергетический объект они выполняют функции котла-утилизатора конвективного типа. В энергетических приложениях их установка рассматривается как обязательная альтернатива водному квенчингу. Введение в схему стадии рекуперативного охлаждения газа позволяет теоретически снизить термодинамические потери в ВЦГ на 5–6 % (с 12–15 до 7–9 %).

КОНСТРУКЦИИ КОНВЕКТИВНОГО ГАЗАОХЛАДИТЕЛЯ

По нашему мнению, конвективный ГО является наиболее перспективным. Существует несколько конструкций конвективного ГО:

- 1) Газотрубная конструкция. ГО состоит из теплообменных элементов, представляющих собой ряд двойных труб (труба в трубе), которые привариваются к овалному сборному каналу с обоих концов, чтобы сформировать регистр ряда двойных труб. Горячий

синтез-газ протекает по внутренним трубам, отдает теплоту воде и пару, протекающим через овалы сборные каналы, и раздается по кольцевым пространствам между внутренней и наружной трубами [3].

Недостатком такой конструкции является забивание проходных сечений синтез-газа золошлаковыми частицами.

- 2) Водотрубная конструкция с прямыми трубами. Теплообменными элементами являются прямые двойные трубы (труба в трубе). Сверху наружная труба закреплена на нижней трубной доске, а нижний торец заглушен. Внутренняя труба сверху прикреплена к верхней трубной доске, а нижний конец трубы открыт. Пар проходит вниз, затем поступает во внутреннюю трубу, проходит по ней и собирается в паросборной камере. Синтез-газ снаружи омывает пакет трубных теплообменных элементов. Зигзагообразное движение внутри корпуса ГО организуется за счет перегородок. Благодаря перегородкам организуется поперечное омывание труб и сбор жидких фракций, конденсирующихся из синтез-газа [4].

- 3) Водотрубная конструкция ГО со спиральными трубами. Теплообменные элементы представляют собой вертикальные спиральные трубы, по которым течет пар и вода. Теплообменник набирается из вертикальных спиралевидных элементов разного диаметра, расположенных один внутри другого. Синтез-газ течет по кольцевым каналам, образованным в радиальном направлении между спиральями.

По мнению авторов [3] наиболее перспективной является конструкция ГО, изображенная на рис. 1.



Рис. 1. Конструкция теплообменных элементов ГО

Для расчета всей поверхности теплообмена газоохладителя вышеприведенной конструкции при $Re = 3900 \div 3 \cdot 10^6$ авторами [3] предложена зависимость:

$$Nu = 0,027 Re^{0,8} Pr^{1/3} \left(\frac{\mu_i}{\mu_w} \right)^{0,14} \quad (1)$$

где Nu – число Нуссельта на газовой стороне; Pr – число Прандтля на газовой стороне; Re – число Рейнольдса на газовой стороне; μ_i – динамическая вязкость газа при температуре вдали от стенки, Па·с; μ_w – динамическая вязкость газа при температуре стенки, Па·с.

Как видно из рис. 2, полученные экспериментальные данные на 25–31 % ниже, чем значения, рассчитанные для коридорного мембранного пучка труб, как наиболее близкой из известных в России конструкций [5].

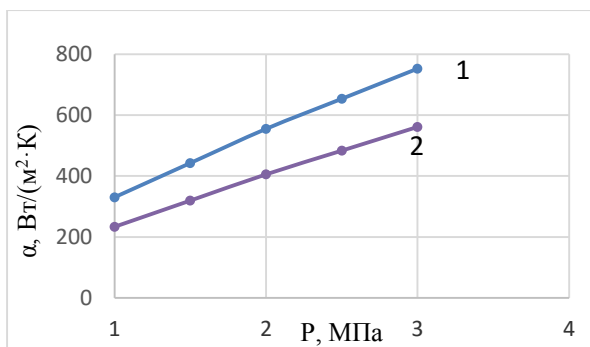


Рис. 2. Сравнение коэффициентов теплопередачи различными методами: 1 – расчет по формуле, 2 – экспериментальные данные

МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ГО

В качестве объекта моделирования принята описанная выше экспериментальная установка газоохладителя с мембранными трубными спиралями (рис. 1) [3]. Моделирование осуществляется в пакете CFD, в целях упрощения расчет ведется не в кольцевом, а в плоском зазоре (рис. 3).

Расчетная модель состоит из трех объектов: паровая среда, стальной мембранный коридорный пучок труб, синтез-газ. Для получения более точного результата сетка модели выполнена «тонкой» и состоит из 4 571 224 элементов. Для описания течения использована $k-\omega$ модель турбулентности с модификацией переноса напряжений сдвига (Shear Stress Transport, SST).

При моделировании начальная температура синтез-газа составляет 1100 °С, начальное давление 3,5 МПа, скорость газов на входе в установку 10 м/с.

Результаты расчетов представлены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты проведенных расчетов в пакете CFD

Параметры	Величина
Температура синтез-газа на входе, К	1373
Температура синтез-газа на выходе, К	1315
Температура пара на входе, К	601
Средняя температура пара на выходе, К	631
Количество тепла, Вт	21244

По результатам моделирования рассчитан средний коэффициент теплоотдачи со стороны синтез-газа 984 Вт/(м²·К), что выше данных эксперимента [3] на 8%, таким образом созданную модель можно считать верифицированной.

Полученная модель использовалась для оценки возможного нарушения эксплуатационного режима, в соответствии с [6, 7] рекомендуется поддерживать скорость в каналах в диапазоне 3-8 м/с. Более высокая скорость ведет к эрозионному износу поверхности трубок, а более низкая скорость увеличивает осаждение частиц, ухудшая эффективность теплопередачи. Поэтому скорость в узком сечении канала была принята 8 м/с (что соответствует средней скорости газа на входе в установку – 3 м/с). В результате получено поле скоростей, представленное на рис. 4. Зоны со скоростями менее 3 м/с или более 8 м/с, практически отсутствуют, что позволяет судить о выполнении рекомендаций [6, 7] по условиям исключения образования минимальных отложений абразивного износа.

Полученные результаты были использованы для расчета конвективного газоохладителя ПГУ с ВЦГ мощностью 500 МВт.

Исследование выполнено в Уральском федеральном университете за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-19-00524).

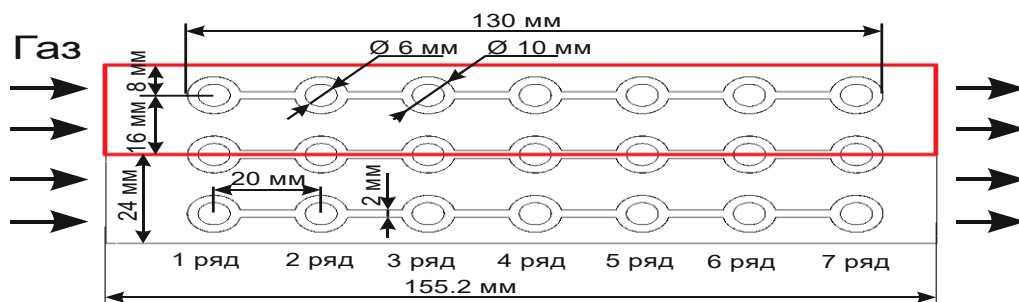


Рис. 3. Модель теплообменного элемента в пакете CFD

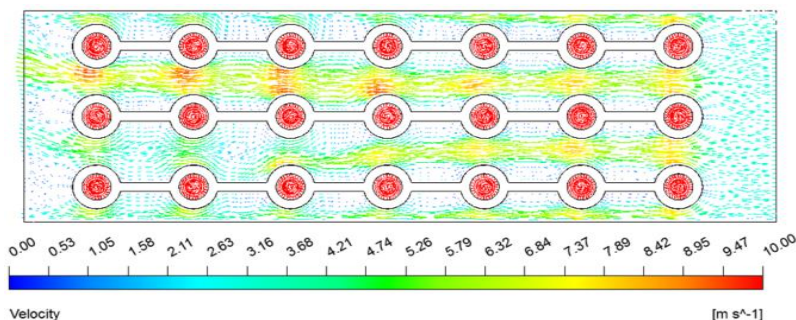


Рис. 4. Поле скоростей модельном теплообменном элементе

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гибридные ПГУ на твердом топливе / Т.Ф. Богатова, А.Ф. Рыжков, Н.В. Вальцев, П.В. Осипов, С.И. Гордеев // Энергетик. 2014. №12. С. 12-16.
2. Oakey J.E. Power plant life management and performance improvement. Woodhead Publishing Limited, 2011.
3. Convective heat transfer characteristics of high-pressure gas in heat exchanger with membrane helical coils and membrane serpentine tubes / Zhen Yang, Zhenxing Zhao, Yinhe Liu, Yongqiang Chang, Zidong Cao. Experimental Thermal and Fluid Science 35 (2011) 1427–1434.
4. Cooler Systems for Gasification Plants 07/2015, SCHMIDTSCH SCHACK.
5. Тепловой расчет котлов (Нормативный метод). СПб.: изд-во НПО ЦКТИ, 1998. 255 с.
6. Modeling and analysis of a syngas cooler with concentric evaporator channels in a coal gasification process / Junho Oh, In-Soo Ye, Sangbin Park, Changkook Ryu, Sung Ku Park // Korean J. Chem. Eng. – 2014. – №31(12). P. 2136 – 2144.
7. Gas and particle flow characteristics in the gas reversing chamber of a syngas cooler for a 300 MWe IGCC process / Sangbin Park, In-Soo Ye, Junho Oh, Changkook Ryu, Ja Hyung Koo // Applied Thermal Engineering. – 2014. – №70. P. 388 – 3.

УДК 621.07

Н. А. Семенов, Р. Р. Хасанов, Г. И. Худякова

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина,
г. Екатеринбург, Россия

КИНЕТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ КОНВЕРСИИ УГОЛЬНОГО ТОПЛИВА

В работе проведено сравнение установок и методов исследования конверсии твердого топлива с получением кинетических характеристик процесса. Проанализированы результаты экспериментальных исследований различными методами конверсии в воздушной среде коксового остатка антрацитовых пыли.

Ключевые слова: метод ТГА, дериватограф, конверсия, антрацит, степень конверсии, газ-реагент, угольная пыль.

N. A. Semenov, R. R. Khasanov, G. I. Khudyakova

Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

KINETIC PARAMETERS OF COAL CONVERSION

In the paper the comparison of the facilities and methods of the solid fuel conversion study to get the process kinetic characteristics is carried out. The results of experimental studies of various conversion methods in air coke anthracite dust are analyzed.

Keywords: TGA method, derivatograph, conversion, anthracite, conversion degree, reactant gas, coal dust.

Метод термогравиметрического анализа (ТГА) чаще всего проводится с мелкими, пылевидными частицами, что делается с целью равномерного распределения засыпки по дну тигля. В этом случае обеспечивается наилучший контакт материала с поверхностью и величина ДСК сигнала, регистрирующего экзо- или эндотермический эффект реакции, становится более выраженной. К недостаткам метода можно отнести невозможность проведения экспериментов под давлением в традиционных приборах ТГА, необходимость отработки методики для каждого вида топлива. К преимуществам метода следует отнести широкий набор промышленно выпускаемых анализаторов для работы в широком диапазоне температур, непрерывный учет убыли массы, синхронизируемый с показаниями газового анализа, наличие стандартов [1].

Эксперименты проводились на приборе NETZSCH STA 449F3 со стандартным ТГ-ДСК держателем (рис. 1). Получаемая в эксперименте кривая изменения

массы образца в зависимости от времени дает возможность определить скорость реагирования твердого топлива в процессе конверсии при разных температурах, заданной скорости нагрева, подаваемом газовом носителе, а также рассчитать эффективные значения кинетических параметров путем соответствующей математической обработки.

Температурная программа эксперимента состояла из подготовительных сегментов, на которых подавался инертный газ, для получения коксового остатка из исходного угля; последующий этап – сжигание коксового остатка в воздушной среде. Серия экспериментов включала изотермические измерения при 400-1000 °С. Для исследования были отобраны образцы тонкодисперсной пыли антрацита зольностью $A^d = 13\%$, размером частиц 90-200 мкм.

Дериватограф аналогичен прибору ТГА, описанному выше, таким образом анализаторы типа NETZSCH

СТА 449F3 являются поколением приборов, следующим за традиционными дериватографами [2]. Преимущество ТГА заключается в более качественной оценке убыли массы, использовании газовых смесей (с возможностью одновременно вводить несколько газов), проведении синхронного газового анализа. Увеличены возможные скорости нагрева печи, существует возможность программирования многостадийного процесса конверсии навески с применением различных сред (инертная, окислительная, восстановительная) и чередованием изотермических и динамических режимов в любой последовательности.

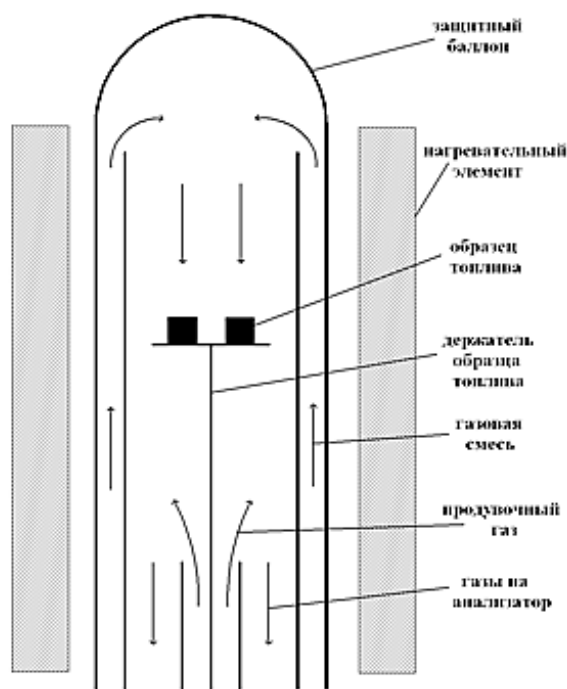


Рис. 1. Схема печи измерительного блока ТГА

Учитывая быстроту, точность и отработанность метода синхронного термического анализа, следует выделить инструментальные преимущества приборов ТГА при изучении процессов сжигания и газификации угля. Немаловажным при выборе ТГА является выявленная в настоящей работе схожесть значений E_a , k , получаемых при сжигании угля, в сравнении с методом падающих в потоке частиц.

Изучение конверсии пыли коксового остатка антрацита проводилось под руководством В.И. Бабия [3] на установке с падающими частицами (рис. 2).

Метод падающих в спутном потоке частиц предназначен для изучения кинетики взаимодействия предварительно откоксованной угольной пыли с газами. Угольная пыль подавалась в установку ячейковым питателем с расходом порядка 30 г/мин, затем транспортировалась потоком аргона через змеевиковый нагреватель в реакционную камеру. Перед входом в камеру в поток пылевзвеси вводилось определенное количество подогретого до той же температуры воздуха (с содержанием 5-21 % O_2). Если в упомянутом выше методе изучаемые образцы разогреваются вместе с печью, то данный способ позволяет подавать уголь непосредственно в разогретый реактор (скорость пылегазового потока на рабочем участке 20-40 м/с). К недостаткам

метода можно отнести ограниченность по применимости для крупных частиц, необходимость проведения большого количества экспериментов с варьируемыми параметрами (температура, концентрации газа-реагента). К преимуществам метода относится наибольшая приближенность эксперимента к условиям действующих установок.

Сравнительная характеристика методов приведена в таблице 1.

Общее уравнение кинетики реакции выглядит как:

$$\frac{dX}{d\tau} = k_o \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \cdot f(X) \quad (1)$$

Степень конверсии (X) или глубина выгорания топлива определяется как отношение убыли массы к начальной массе навески в данный момент времени:

$$X = \frac{m_0 - m_\tau}{m_0} \quad (2)$$

Скорость конверсии на текущую массу определяется как убыль органической массы по времени по отношению к начальной массе навески:

$$R_\tau = \frac{1}{(1-X)} \frac{dX}{d\tau} = k_o \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) = k(T) \quad (3)$$

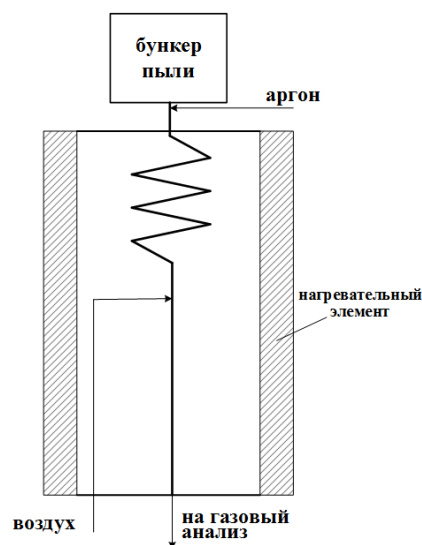


Рис. 2. Схема экспериментальной поточной установки для определения кинетических констант горения угольной пыли

В силу того, что коксозольный остаток — это основа топлива, и он является наиболее сложной его частью в процессе конверсии, изучению кинетики конверсии кокса посвящается значительная часть исследований. На рис. 3 приведены результаты определения удельной скорости конверсии коксового остатка антрацита в воздушной среде на описанных выше установках.

Анализируя приведенные на рисунке кривые, можно выделить несколько режимов: реагирование по всему объему частицы при низких температурах, благодаря хорошему доступу окислителя внутрь частицы; с ростом температур уменьшается энергия активации и влияние взаимодействия окислителя и углерода

внутри частицы оказывает меньшее влияние на процесс.

Проведен сравнительный анализ методов исследования конверсии органических топлив. Установлено, что

метод термического анализа позволяет экспериментально определять исходные данные для математического моделирования процессов термохимического превращения в воздушной среде.

Таблица 1

Параметры экспериментальных установок			
Тип установки	ТГА	Дериватограф	Установка В.И. Бабия
Взаимодействие топлива и газовой среды	Газовый поток обтекает тигель с навеской топлива	Газовый поток обтекает тигель с навеской топлива	Падающие в спутном потоке газа частицы
Вид топлива, его характеристики	Предварительно откоксованная угольная пыль, <0,2 мм	Натуральное и подготовленное топливо	Предварительно откоксованная угольная пыль, <0,2 мм
Газовая среда	Инертная, окислительная, восстановительная	Инертная, воздушная.	Кислород в различных концентрациях
Расчет удельной скорости выгорания	По весовому / газовому анализу	По весовому анализу	По газовому анализу

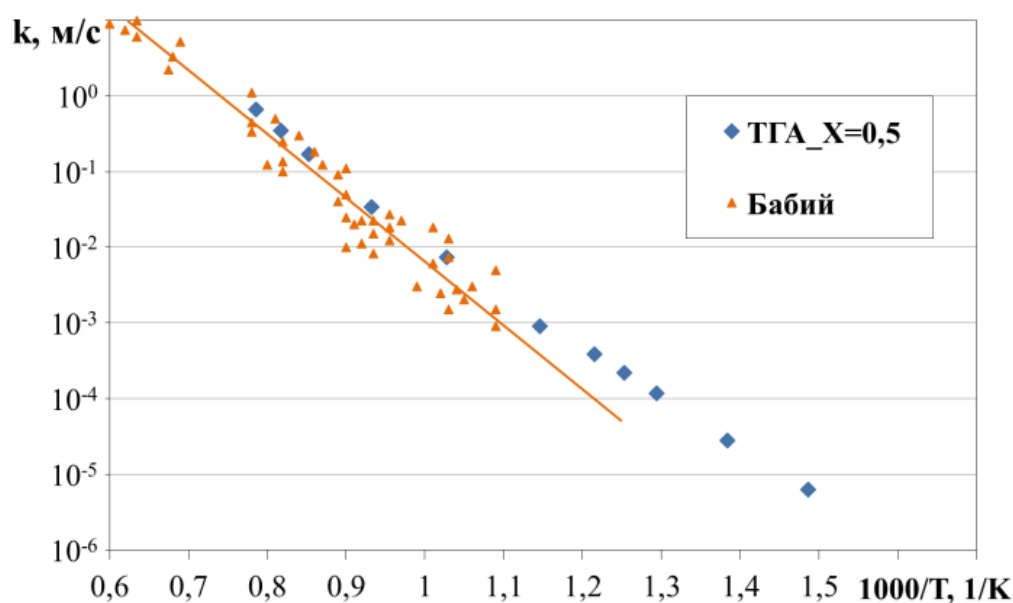


Рис. 3. Скорость выгорания коксового остатка антрацита

Показано, что для кокса низкорреакционного угля при $X = 0,2 - 0,8$ данные, полученные методом ТГА (400 – 550 °C $E_a = 132,7$ кДж/моль), дополняют в области низких температур результаты Бабия (малозольная угольная пыль антрацита $d_p = 0,01 - 0,1$ мм, $A^d = 6$ %) по конверсии коксового остатка, полученные на поточной установке, а в области выше 600 °C имеют хорошее совпадение и кривая имеет одинаковый наклон, следовательно, и равные значения энергии активации. Применяя методику выделения кинетической составляющей получаем для коксового остатка антрацита в изотермическом режиме при степени конверсии $X = 0,5$ в диапазоне температур 400 – 550 °C $E_a = 132,7$

кДж/моль, в диапазоне температур 550 – 1000 °C $E_a = 152,6$ кДж/моль и $k_0 = 6 \cdot 10^6$ м/с.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Vyazovkin S., Burnhamb A. K., Criadoc J.M., Pérez-Maquedac L.A., Popescud C., Sbirrazzuolie N. ICTAC Kinetics Committee recommendations for performing kinetic computations on thermal analysis data // *Thermochimica Acta*. 2011. Vol. 520. Pp. 1-19.
2. Дериватограф Q-1500 D. Руководство по эксплуатации // МОМ, завод оптических приборов, Будапешт.
3. Бабий В.И., Куваев Ю.Ф. Горение угольной пыли и расчет пылеугольного факела. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 208 с.

УДК 621.365.5

*Е. И. Маринкова, А. Ю. Борисов, А. А. Шабурова, В. Э. Фризен*Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина,
г. Екатеринбург, Россия

ЛЕВИТАЦИОННАЯ ПЛАВКА В КОНУСНОМ ВЫСОКОЧАСТОТНОМ ИНДУКТОРЕ С ОБРАТНЫМ ВИТКОМ

В докладе приведены результаты компьютерного и экспериментального исследования эффекта плавки во взвешенном состоянии в индукторе с обратным витком. Продемонстрирована адекватность математической и компьютерной модели данного процесса.

Ключевые слова: взвешенное состояние металла; левитационная плавка; индуктор с обратным витком; электромагнитная сила; положение равновесия.

E. I. Marinkova, A. Y. Borisov, A. A. Shaburova, V. E. Frizen

Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

LEVITATION MELTING IN CONIC HIGH FREQUENCY INDUCTOR WITH REVERSE TURN

This paper presents the results of computer and experimental study of levitation melting effect in the inductor with reverse turn. It is demonstrated the adequacy of mathematical and computer models of this process.

Key words: metal suspension; levitation melting; inductor with the reverse turn; electromagnetic force; equilibrium.

Воздействие электромагнитного поля позволяет не только нагревать и плавить металл, но и удерживать его в пространстве без привычных тиглей или ограничивающих стенок, что состоит в непосредственном контакте с загрузкой. Поскольку данный метод плавки свободен от недостатков контакта вторичного элемента с материалом тигля, он является одним из методов сверхчистой плавки. Процесс такого рода плавки металла во взвешенном состоянии называют плавкой в электромагнитном тигле или просто левитационной плавкой. Эффект левитации металла достигается только в условиях неоднородного магнитного поля. При взаимодействии индуцированного тока с вызывающим его полем в поверхностном слое металла возникают механические силы давления. В условиях, когда результирующая электромагнитных сил направлена противоположно силе гравитации, при достаточно большой мощности, подводимой к металлу, можно обеспечивать удержание металла во взвешенном состоянии [1, 2].

Одним из вариантов устойчивой левитационной плавки является использование конструкции индуктора, выполненного из медной трубки, содержащего несколько витков в прямом направлении и один – в обратном. Такая конструкция обеспечивает внутри индуктора область, в которой магнитное поле меньше, чем вокруг нее. Металл, помещенный в переменное электромагнитное поле, выталкивается в область меньших полей, и положение образца внутри индуктора будет более устойчивым. В настоящее время существует большой интерес к левитационной плавке и возможной перспективе использования ее в промышленных масштабах.

Основным направлением исследования процесса левитационной плавки является эффект удержания во взвешенном состоянии капли жидкого металла. С целью изучения данного эффекта проведено моделирование процесса в программном пакете ELCUT. Созданная задача магнитного поля переменных токов позволила промоделировать технологический процесс на интересующей нас стадии. Рассчитанная мощность, выделяемая непосредственно в испытываемом образце, была взята за основу расчетов параметров цепи питания.

По результатам расчета индуктора, проведенного в пакете Mathcad, была создана лабораторная установка высокочастотного конусного индуктора с обратным витком. Конусный индуктор высотой $H = 43$ мм содержит 5 основных витков и 1 обратный виток (рис. 1).



Рис. 1. Лабораторная установка левитационной плавки в индукторе с обратным витком

Индуктор изготовлен из поллой медной трубки диаметром 6 мм, предусматривающей водяное охлаждение. Среднее расстояние между витками составляет 8-10 мм. В качестве испытуемого образца был выбран алюминиевый, массой 6 г.

Опыт показал весьма хорошую сходимость с результатами расчета и моделирования. На стадии перегрева жидкий металл принимал форму, описанную в [2] и взятую за основу моделирования осесимметричной задачи в ELCUT. После был проведен поверочный расчет модели, уже с более конкретной формой, которую удалось достигнуть в ходе эксперимента.

РЕЗУЛЬТАТЫ

По итогам математического расчета и компьютерного моделирования была выявлена хорошая сходимость результатов, проверенная экспериментально. Мощность на осуществление технологического процесса оказалась на уровне 50 Вт, что подтвердилось показаниями как моделирования, так и в ходе эксперимента. Условиями удержания капли расплавленного металла стали аксиальная составляющая силы Лоренца, что уравнивала силу тяжести, действующую на вторичный элемент, а также была достигнута нулевая раз-

ница между величиной давления сжатия и гидростатическим давлением в объеме капли, которая предотвращает возможность растекания жидкого металла.

Следует отметить, что проведенное исследование рассматривает лишь часть всего процесса левитационной плавки в индукторе с обратным витком. Планируется провести полный анализ технологического процесса, а также испытания с различными металлами в качестве загрузки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Слухоцкий А.Е., Рыскин С.Е. Индукторы для индукционного нагрева. Л., «Энергия», 1974. – 264 с.
2. Фогель А.А. Индукционный метод удержания жидких металлов во взвешенном состоянии. Л., «Машиностроение» 1979. – 104 с.
3. Глебовский В.Г., Бурцев В.Т. Плавка металлов и сплавов во взвешанном состоянии. М., «Металлургия», 1974. – 171 с.
4. Яичков И.М., Ларина Т.П. Экспериментальное исследование положения тела во взвешенном состоянии в цилиндрическом высокочастотном индукторе с обратным витком // ЭСик, 2015. – №2(27). – С. 39-43.

УДК 004.942

Д. А. Немков, А. В. Матвеев, С. Е. Щеклеин, Ю. Е. Немихин

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина,
г. Екатеринбург, Россия

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ДВУОСНОГО СОЛНЕЧНОГО ТРЕКЕРА

В работе приводится математическая модель солнечного трекера, описывающая ориентационные и энергетические характеристики. Демонстрируются результаты численного моделирования в соответствии с приведенной моделью.

Ключевые слова: солнечная энергетика; солнечные трекеры; математическое моделирование.

D. A. Nemkov, A. V. Matveev, S. E. Shcheklein, Y. E. Nemikhin

Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

MATHEMATICAL MODELING OF THE DUAL AXIS SOLAR TRACKER

This article is devoted to the mathematical model of the solar tracker, describing the orientation and power characteristics. The numerical simulation results according to the motioned model are demonstrated.

Key words: solar energy; solar trackers; numerical simulation.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящий момент существующие математические модели солнечных трекеров в основном нацелены на описание связей углов ориентации солнечного трекера и углов положения Солнца на небесной сфере [1-3]. Данные модели не годятся для анализа энергетической эффективности солнечного трекера. Ввиду этого, было принято решение построить математическую модель, адаптированную под конкретную установку [4, 5]. Данная модель связывает величины солнечной

инсоляции, угла ориентации солнечного трекера и эффективную энергию на выходе с установки. Построенная математическая модель основана на элементарных законах, описывающих процессы поступления солнечной инсоляции на поверхность приемника.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Известно [6], что величина потока прямой солнечной радиации, падающей на поверхность приемника, зависит от угла между нормалью к поверхности приемника

и направлением от плоскости приемника на Солнце. Данная зависимость выражается следующим образом:

$$P_{\text{на поверхности}} = P_{\text{прямая радиация}} \cdot \eta_{or}(\theta) \quad (1)$$

где $\eta_{or}(\theta)$ – коэффициент, учитывающий влияние величины угла на ту долю прямой радиации, которая приходится на поверхность приемника.

Также известно, что суммарный поток радиации на поверхность приемника складывается из величин прямой и рассеянной солнечной радиации:

$$P_{\Sigma} = P_{\text{прямая радиация}} \cdot \eta_{or}(\theta) + P_{\text{рассеянная радиация}} \quad (2)$$

Солнечный трекер – устройство, позволяющее производить автоматическую ориентацию полезной нагрузки (устройств солнечной энергетики) непосредственно в направлении на Солнце. Разрабатываемая модель солнечного трекера строится исходя из следующих допущений: трекер ориентируется точно на Солнце; трекер производит ориентацию мгновенно.

Разобьем интервал времени $[0, T]$ между восходом и закатом на интервалы n точками. Ориентация солнечным трекером производится на угол, соответствующий середине интервала $[t_i, t_{i+1}]$. Суммарная эффективная энергия на выходе будет складываться исходя из количеств энергии, полученных на каждом временном интервале. Итоговая математическая модель солнечного трекера формулируется следующим образом.

$$E_{\Sigma} = F \sum_{i=0}^{n-1} \int_{t_i}^{t_{i+1}} [P_d(t) \eta_{or}(\Theta(t)) + P_s(t)] \eta_{en}(t) dt - E_{suff} \quad (3)$$

где E_{Σ} – суммарная энергия на выходе с солнечной установки с солнечным трекером, Дж; F – площадь приемника энергии, m^2 ; n – количество поворотов ориентации; t_i, t_{i+1} – временные интервалы ориентации, с; $U_i[t_i, t_{i+1}] = [t_0; T]$ – время между восходом и закатом; $P_d(t)$ и $P_s(t)$ – соответственно прямая и рассеянная мгновенная солнечная инсоляция, Вт/ m^2 ; $\eta_{or}(t)$ – ориентационный КПД, который в общем случае является зависимостью эффективности ориентации от угла между нормалью к плоскости установки и направлением на солнце $\eta_{or}(\theta)$, выражающийся через время следующим образом:

$$\eta_{or}(\theta(t)) = \eta_{or} \left(\omega t - \frac{t_i + t_{i+1}}{2} \omega + \delta \right) \quad (4)$$

где $\omega = 7,292 \cdot 10^{-5} \text{ c}^{-1}$ – угловая скорость вращения земли, δ – ошибка ориентации; $\eta_{en}(t)$ – энергетический КПД установки; E_{suff} – полные затраты энергии на ориентацию солнечного трекера, Дж.

Зависимости КПД для фотоэлектрического элемента [7] и солнечного концентратора имеют соответственно вид (5) и (8), где l и r соответственно расстояние от плоскости установки до фокального пятна и радиус фокального пятна, м.

$$\eta_{or}^{CONC}(\theta) = \begin{cases} \frac{1}{\pi} \left(2 \arccos \left(\frac{l}{2r} \tan \theta \right) - \sin \left(2 \arccos \left(\frac{l}{2r} \tan \theta \right) \right) \right), & \text{если } |\theta| \leq \arctg \left(\frac{2r}{l} \right) \\ 0, & \text{если } |\theta| > \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (8)$$

$$\eta_{or}^{PV}(\theta) = \begin{cases} \cos \theta, & \text{если } |\theta| \leq \frac{\pi}{2} \\ 0, & \text{если } |\theta| > \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (5)$$

Ориентационный КПД для солнечного концентратора был получен геометрическим методом исходя из формулы определения площади пересечения двух кругов. Данные формулы верны для случая, если конструкция солнечного концентратора имеет такую форму, что падение величины потока солнечной инсоляции из-за затемнения плоскости солнечного концентратора приемником несущественны, т. е. весь поток является полезным.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ СОЛНЕЧНОГО ТРЕКЕРА

При моделировании использовался следующий график зависимости солнечной инсоляции от времени от восхода в секундах (рис. 1). Затраты на поворот могут быть оценены по следующей эмпирической зависимости затрат энергии на поворот от угла поворота:

$$E_{suff}(\theta) = \alpha_{\text{пуск}} \cdot t_{\text{пуск}} \cdot P + P \cdot \theta / \omega \quad (6)$$

где E_{suff} – затраты на поворот на угол θ , Дж; $\alpha_{\text{пуск}}$ – величина пусковых токов, принимается равной 5; $t_{\text{пуск}}$ – время пуска, принимается равным 0,2 с; $P = \beta \cdot P_{\text{пр}}$, Вт – мощность двигателей, принимается равной доле β от суммарной приведенной мощности $P_{\text{пр}} = E / \theta_{\text{полн}} / \omega_{\text{земли}}$, где E – суммарная выработка энергии на солнечной установке, $\theta_{\text{полн}}$ – полный угол от момента восхода и до заката солнца, $\omega_{\text{земли}}$ – угловая скорость вращения Земли; θ – угол поворота, рад; ω – угловая скорость поворота трекера, принимаемая равной 0,1 рад/с.

Суммарные затраты за день могут быть оценены по следующей формуле:

$$E_{suff} = \sum_{i=1}^{n-2} E_{suff} \left(\frac{(t_{i+2} - t_i) \omega_{\text{земли}}}{2} \right) + E_{suff} \left(\frac{(t_{n-2} - t_1) \omega_{\text{земли}}}{2} \right), \quad (7)$$

где последнее слагаемое учитывает ориентацию трекера в конце дня на угол, соответствующий начальному углу для следующего дня.

На рис. 2 зависимости эффективной энергии от количества поворотов при использовании солнечных панелей номеру ряда соответствуют следующие величины β : 1 – 0,001%, 2 – 0,005%, 3 – 0,01%, 4 – 0,015%.

На рис. 3 зависимости эффективной энергии от количества поворотов при использовании солнечного концентратора номеру ряда соответствуют следующие величины β : 1 – 0,03%, 2 – 0,035%, 3 – 0,04%, 4 – 0,045%.

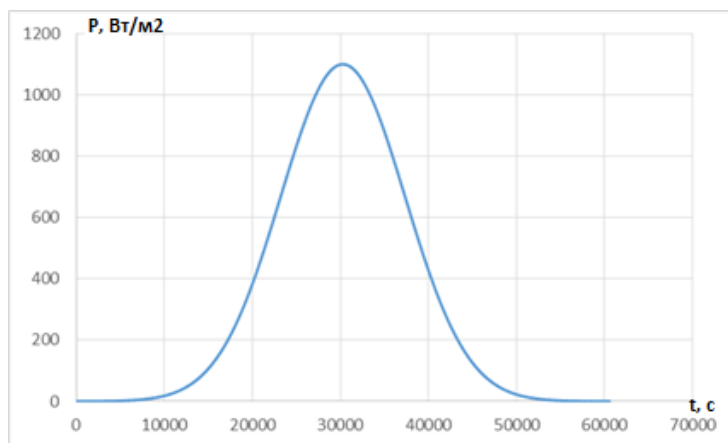


Рис. 1. График зависимости солнечной инсоляции от времени от восхода в секундах

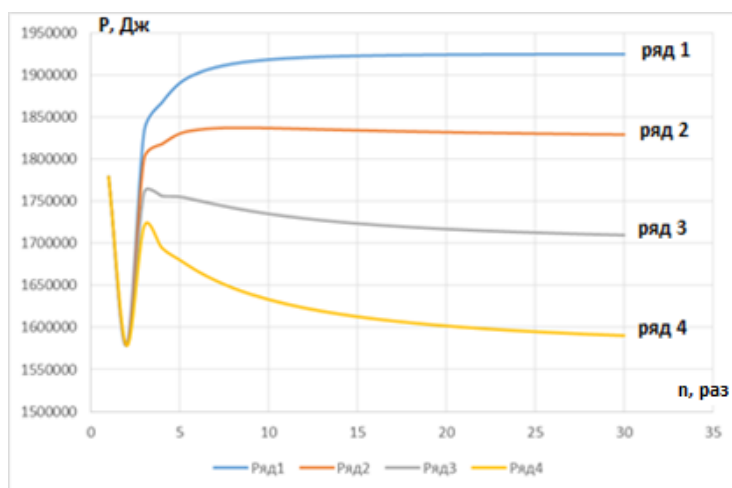


Рис. 2. График зависимости эффективной энергии от количества поворотов для разных затрат энергии на ориентацию для солнечной панели

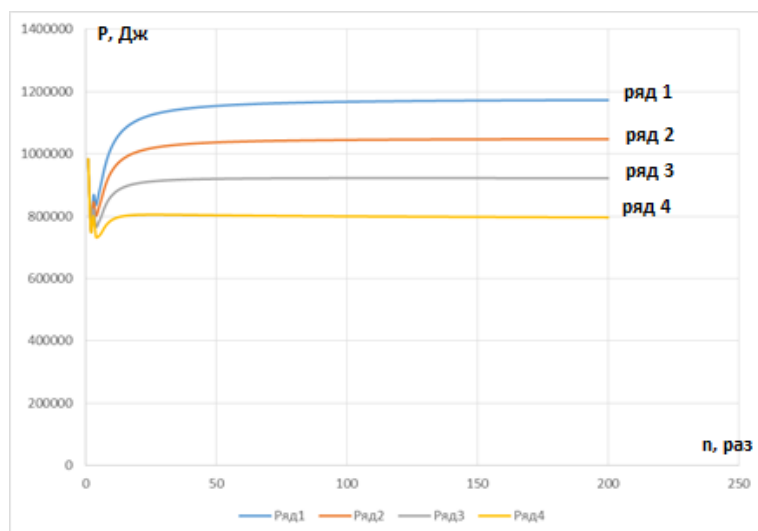


Рис. 3. График зависимости эффективной энергии от количества поворотов для разных затрат энергии на ориентацию для солнечного концентратора на интервале 1-200

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В среднем оптимальным количеством ориентаций солнечного трекера с установленными на нем солнечной панелью и солнечным трекером оптимальным количеством поворотов является соответственно 26-32 и 120-150 поворотов для систем с низкими затратами на ориентацию и перманентной ориентацией на юг для си-

стем с высокими затратами на ориентацию. Полученные значения для трекера с солнечными панелями находятся в соответствии с эмпирически установленными значениями количества ориентации, полученными различными авторами: для безсенсорного активного трекера – 30 поворотов ориентации (Тунис) [8], для активного трекера на солнечных датчиках угла – 28 поворотов (Турция) [9].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Solar tracking performance and economics in Australia // Электронный ресурс URL: <http://www.solarchoice.net.au/blog/solar-trackers/> (дата обращения 03/07/2016)
2. Mejia, A.E., Londoño, M.H. and Osorio, J.C., Diseño e implementación de un seguidor solar para la optimización de un sistema fotovoltaico. Scientia et Technica, 1(44), pp. 245–250, 2010.
3. Huang, B.J., Huang, Y.C., Chen, G.Y., Hsu, P.C. and Li, K., Improving solar PV system efficiency using one-axis 3-position sun tracking. Energy Procedia, 33, pp. 280–287, 2013. PV Asia Pacific Conference 2012.
4. Tudorache, T., Oancea, C.D. and Kreindler, L., Performance evaluation of a solar tracking PV panel. University Politehnica of Bucharest Scientific Bulletin, Series C: Electrical Engineering, 74(1), pp. 3–10, 2012.
5. Екатеринбург – Wikipedia // Электронный ресурс URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Екатеринбург> (дата обращения 04/07/2016)
6. Немков Д.А., Немихин Ю.Е., Матвеев А.В., Одинаев И.Н. Разработка и создание системы слежения за положением солнца // Технические науки в мире: от теории к практике / Сборник научных трудов по итогам международной научно-практической конференции. №2. Ростов-на-Дону, 2015. С. 35–38.
7. Philippe Blanc, Lucien Wald. The SG2 algorithm for a fast and accurate computation of the position of the Sun for multi-decadal time period [Electronic resource] HAL archivesouvertes. Mode of access: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00725987/document> (дата обращения 10/04/2015)
8. Щеклеин С.Е., Немихин Ю.Е., Невьянцев С.В., Коржавин С.А. Комплекс дистанционного мониторинга установок возобновляемой энергетики с использованием Wi-Fi каналов и элементов технического зрения. / WIT Transactions on Ecology and the Environment. V. 2. 2014. P. 1185–1194.

УДК 620.9:662.92

Е. С. Лабинцев, В. Г. Тупоногов, Ю. А. Каграманов

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия

МЕТОДЫ СЕРООЧИСТКИ БИО СИНТЕЗ-ГАЗА В ПАРОВАЗОВЫХ УСТАНОВКАХ С ВНУТРИЦИКЛОВОЙ ГАЗИФИКАЦИЕЙ

В данной статье освещаются основные подходы к сероочистке био синтез-газа паровых установок с внутрицикловой газификацией. Уровень примесей в газе является одним из ключевых факторов эффективного сжигания топлива. Для экономически выгодного использования ресурсов критически важна термодинамическая эффективность процесса очистки. Современным подходом к очистке синтез-газа от примесей серы является горячая сероочистка в кипящем слое сорбента.

Ключевые слова: псевдоожигание; газоочистка; сероочистка; ПГУ с ВЦГ; оксид цинка.

E. S. Labintcev, V. G. Tuponogov, Y. A. Kagramanov

Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

METHODS OF ORGANIC SYNGAS DESULFURIZATION IN IGCC

Ural Federal University, Mira str., 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: kagramanovya@yandex.ru

This article highlights the main approaches to the desulfurization of bio synthesis gas for combined-cycle plants with gasification. The presence of contaminants is one of the key factors for an efficient combustion. For cost-effective use of resources, it is critical to manage and sustain thermodynamic efficiency of the cleaning process. Modern approaches to purification of the synthesis gas from sulfur impurities is hot desulphurization in fluidized bed of sorbent.

Key words: fluidization; gas cleanup, sulfur gas cleanup, IGCC, zinc oxide.

ВВЕДЕНИЕ

Твердое топливо, подвергаемое газификации, содержит вредные примеси (загрязнители), которые в виде твердых частиц и паровой фазы переходят в состав получаемого синтез-газа. Типичные уровни примесей в исходном топливе, включая уголь, представлены в табл. 1 [1].

Для исключения эрозии лопаток газовых турбин, отложений на поверхностях, коррозии материалов оборудования [2, 3], а также токсического воздействия на используемые катализаторы и сорбенты в схемах IGCC (integrated gasification combined cycle – паровая установка с внутрицикловой газификацией) предусматривается очистка угольного синтез-газа от твердых частиц, нитросодержащих примесей, хлоридов, щелочных металлов и серы. Помимо

ПГУ с ВЦГ, очистка синтез-газа находит применение и в установках топливных элементов, где это необходимо как из технических, так и из экологических соображений.

По температурному уровню процессы газоочистки делят на холодную – CGC (cold gas cleanup), осуществляемую как при положительных температурах (как правило ниже температуры конденсации водяных паров), так и отрицательных (например, при – 62 °С для охлажденного метанола, используемого при удалении кислых газов) [5], и горячую – HGC в интервалах от 300–400 °С до 1000 °С и выше в зависимости от вида удаляемого компонента. Для некоторых примесей между холодной и горячей газоочисткой выделяют промежуточный интервал для теплой газоочистки – WGC, чаще всего принимаемый для температур выше точки кипения воды, но еще допускающих конденсацию хлорида аммония NH_4Cl с верхним значением около 300 °С.

Таблица 1

Процентный состав примесей в сырье [1]

Вид загрязнения	Древесина (за вычетом влаги; % по массе)	Солома	Уголь
Сера	0,01	0,2	0,1–5
Азот	0,25	0,7	1,5
Хлор	0,03	0,5	0,12
Зола (основные компоненты)	1,33	7,8	9,5
K_2O	0,04	2,2	1,5
SiO_2	0,08	3,4	2,3
Cl	0,001	0,5	0,1
P_2O_5	0,02	0,2	0,1

При построении многоступенчатой схемы газоочистки, как и во всей схеме ПГУ, термодинамически выгодно не снижать температуру газа в каком-либо элементе схемы ниже температуры процесса в следующем элементе. Поэтому повышение температурного уровня газоочистки (в идеале до температуры на выходе из газогенератора) и сокращение ступеней охлаждения-нагрева в системе повышает термодинамическую эффективность цикла, поскольку снижаются потери эксергии рабочего тела и потери располагаемой теплоты в теплообменном оборудовании.

Соединения серы в синтез-газе содержатся в основном в виде сероводорода H_2S и в небольших количествах как карбонил сульфид COS. Концентрация сероводорода в газе может составлять от 0,1 мл/л до более чем 30 мл/л в зависимости от газифицируемого топлива [1]. Показанные на рис. 1 методы объединяют более 30 разработанных сухих и мокрых технологий сероочистки, выполняемых при различных температурных уровнях. Прямые методы удаления соединений серы включают в себя два вида конверсии с использованием сухого и жидкостного процесса. Непрямые методы совмещены с удалением так называемых кислых газов, включая CO_2 .

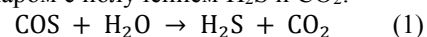
Рис. 1. Способы удаления H_2S [1]

Предварительная (до сжигания) сероочистка газа от H_2S , как правило, выгодна экономически, поскольку при удалении SO_2 из продуктов сгорания их массовый расход значительно превышает расход серосодержащего топливного газа. По диапазонам температур процессы сероочистки классифицируются на холодную – CGD (cold gas desulfurization) при температурах процессов около температуры окружающей среды ($< 100^\circ\text{C}$) и горячую очистку газа (HGD) при температурах от 350–400 °С до 1300 °С и выше. Промежуточный интервал температур для процессов сероочистки синтез-газа IGCC не классифицируется. Горячая сероочистка, как наиболее эффективная, в настоящее время интенсивно исследуется. В большей степени разработаны процессы на уровне температур до 500–600 °С, в которых в качестве регенерируемых сорбентов применяются монооксиды металлов. Для более высоких температур требуется освоение композитных сорбентов, содержащие оксиды нескольких металлов или их соединений [5].

ХОЛОДНАЯ СЕРООЧИСТКА

Процесс холодной газоочистки является хорошо изученным вариантом очистки синтез-газа от сернистых соединений с применением жидких сорбентов – растворителей метилдиэтанолamina (MDEA), моноэтанолamina (MEA), диэтанолamina (DEA) и других. В процессе сероудаления происходит глубокое охлаждение синтез-газа до уровня комнатных температур в 25–30 °С, снижающее термодинамическую эффективность цикла ПГУ. Технология холодной сероочистки включает в себя следующую последовательность: исходный синтез-газ с температурой 350 °С входит в мокрый скруббер для удаления твердых частиц и хлоридов, где охлаждается до 150 °С и увлажняется практически до состояния насыщения. Мокрые скрубберы работают с использованием непрерывной подачи воды. Выходящая грязная вода уносит твердые частицы и другие примеси и повторно используется в другом месте цикла.

Затем синтез газ поступает в установку гидролиза COS. В установке синтез-газ проходит через катализатор, где COS реагирует с содержащимся в синтез-газе водяным паром с получением H_2S и CO_2 :



Затем для удаления H_2S сырой синтез-газ должен быть охлажден почти до комнатной температуры в

последовательно соединенных охладителях, где могут быть использованы различные охлаждающие теплоносители. Первым охладителем нагревается чистый синтез-газ, выходящий из установки удаления кислого газа, охлаждая при этом сырой синтез-газ до указанной температуры на выходе. Во втором охладителе газ обычно охлаждается конденсатом котла-утилизатора. В последнем охладителе теплота газа отводится к внешнему источнику (например, охлаждающей воде). При охлаждении происходит осушение синтез-газа, образующийся конденсат отводится через дренаж. Минимальная разность температур теплоносителей в охладителях ограничена 5 °С.

Подготовленный таким образом синтез-газ с температурой 30–40 °С пропускают далее через установку удаления кислых газов – AGR. Входным элементом установки является противоточный абсорбер, где H₂S, содержащийся в синтез-газе, реагирует с жидким сорбентом и удаляется с эффективностью 98–99 %. Выходящий из абсорбера очищенный синтез-газ отводится из установки. Остальные элементы установки предназначены для регенерации выходящего из абсорбера сорбента-растворителя, насыщенного H₂S. Сорбент перекачивается в десорбер и бойлер, где происходит его нагрев паром до распада промежуточного соединения и высвобождения H₂S, что позволяет регенерировать растворитель.

Далее сорбент охлаждается и закачивается обратно в колонну. H₂S вместе с некоторой частью CO₂ и пара выходит из десорбера, и охлаждается в конденсаторе для удаления воды. Сепарированный в отстойнике конденсат отводится в десорбер, а кислый газ обычно отправляется на пункт установки для извлечения серы. Для того чтобы выделить H₂S из растворителя, с греющим паром должно быть подведено значительное количество теплоты.

ГОРЯЧАЯ СЕРООЧИСТКА

Повышенное внимание к горячей сероочистке связано с ростом объемов производства синтез-газа, технологии использования которого предусматривают очистку от сероводорода. Сероочистка при повышенных температурах также не имеет недостатков холодной газоочистки, связанных с глубоким охлаждением сырого синтез-газа, наличием грязных потоков и длинной технологической цепочкой.

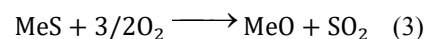
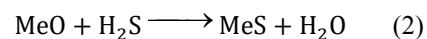
Сухие высокотемпературные методы очистки от сероводорода основываются на использовании как одноразовых нерегенерируемых, так и регенерируемых сорбентов. В современных схемах сероочистки IGCC применяются регенерируемые сорбенты, допускающие многократную реверсивную адсорбцию серы из сероводорода синтез-газа. Сорбенты должны иметь следующие основные характеристики [1, 6]:

- высокие константы равновесия и скорости реакции сульфидизации;
- достаточную сероемкость;
- высокую избирательность реакции сульфидизации, чтобы минимизировать побочные реакции;

- сопротивляемость к восстановлению водородом, содержащемся в синтез-газе;
- высокую механическую прочность против истирания;
- хорошую регенерируемость при невысоких затратах;
- приемлемый интервал рабочих температур.

Исследования показали [7], что в большей степени требованиям к сорбентам высокотемпературной десульфуризации и минимизации свободной энергии реакций соответствуют оксиды металлов, среди которых определены семь наиболее перспективных – оксиды Zn, Fe, Cu, Mn, Mo, V [5]. Максимальная рабочая температура для оксидов цинка составляет 650 °С, меди и железа – 700 °С, марганца – до 1000 °С [1, 8].

При очистке угольного синтез-газа от H₂S моно- и полиметаллические сорбентами происходят следующие реакции сульфидизации и регенерации:



Наилучшими термодинамическими и эксплуатационными характеристиками обладают сорбенты на основе ZnO, имеющие уровень рабочих температур 400–650 °С, сероемкость больше 300 г/кг и степень очистки от H₂S при 650 °С до 7 мкл/л [5].

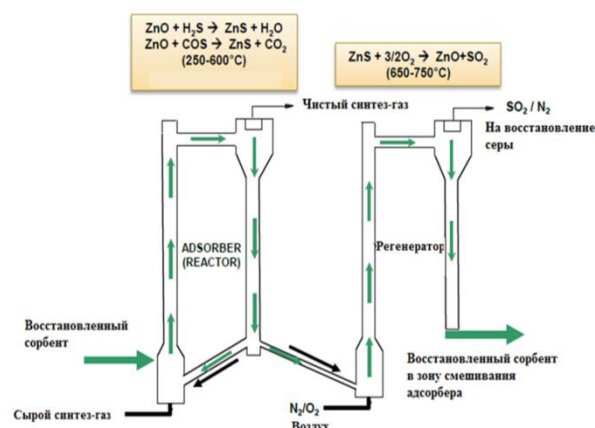


Рис. 2. Процесс горячей газоочистки RTI [12]

Технические параметры ZnO сорбентов подбираются в зависимости от конкретных условий сероочистки. При температурах больше 550 °С уже заметна возгонка металлической реакционной поверхности сорбента, поэтому для повышения температурных характеристик применяются цинкоферритовые и цинкотитанитовые сорбенты [9, 10]. При регенерации ZnO сорбентов температурный уровень реакции (3) должен быть выше среднетемпературного в 550 °С для предотвращения образования сульфатов цинка. Допустимая разница температур процессов сульфидизации и десульфуризации выбирается из условий прочности материала сорбентов к перепадам температур [11]. Примером схемы организации процесса горячей сероочистки может служить разработка Research Triangle Institute [12], показанная на рис. 2.

Выполненный термодинамический анализ применения горячей сероочистки для станции с IGCC показал увеличение электрического к.п.д. на 2,5 % при незначительном снижении ее мощности. Изменение температуры сероочистки в интервале 400–650 °C не оказывает заметного влияния на параметры цикла.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Woolcock P.J., Brown R. C. A review of cleaning technologies for biomass-derived syngas // Biomass and Bioenergy. 2013. V. 52. P. 54-84.
2. Newby RA, Yang W-C, Bannister RL. Fuel gas cleanup parameters in air-blown IGCC // J Eng Gas Turbines Power. 2000. V. 122(2). P. 247-254.
3. Stiegel GJ, Maxwell RC. Gasification technologies: the path to clean, affordable energy in the 21st century // Fuel Process. Technol. 2001. V. 71(1-3). P. 79-97.
4. Korens N, Simbeck DR, Wilhelm DJ. Process screening analysis of alternative gas treating sulfur removal for gasification: Revised final report; 2002.
5. Vamvuka D., Arvanitidis C., Zachariadis D. Flue gas desulfurization at high temperatures: a review // Environ. Eng. Sci. 2004. V. 21(4). P. 229-268.
6. Bakker W.J.W., Kapteijn F., Moulijn J.A. A high capacity manganese-based sorbents for regenerative high temperature desulfurization with direct sulfur production. Conceptual process application to coal gas cleaning // Chem. Eng. Journal. 2003. V.96. P.223-235.
7. Phillip R. Westmoreland, James B. Gibson, Douglas P. Harrison. Comparative kinetics of high-temperature reaction between hydrogen sulfide and selected metal oxides // Environ. Sci. Technol. 1977. V. 11 (5). P. 488–491.
8. Giuffrida A., Romano M. C. On the effects clean-up temperature in IGCCs // Proceedings of ASME Turbo Expo 2010. Power for Land, Sea and Air CT 2010. June 14-18. 2010. Glasgow, UK.
9. Focht, G.D., Renade P. V., Harrison D. P. High temperature desulfurization using zinc ferrite: Reduction and sulfidation kinetics.// Chemical Engineering Science. 1988. V. 43. P. 3005-3013.
10. Woods M. C., Gangwal S. K., Jothimurugesan K., Harrison D. P. Reactions between H₂S and zinc oxide-titanium oxide sorbents. Single pellet kinetic studies// Industrial & Engineering Chemistry Research. 1990. V. 29. P. 1160-1167.
11. Rapagna S., Gallucci K., Di Marcello M., Foscolo P.U., Nasken M., Heidenreich S. In situ catalytic ceramic candle filtration for tar reforming and particle abatement in fluidized-bed biomass gasifier // Energy Fuel. 2009. V. 23(7). P. 3804-3809.
12. RTI Warm Syngas Cleanup Technology Demonstration // 8-th International Freiberg Conference on IGCC & XtL Technologies. Freiberg. Germany. June 13, 2016.

УДК 620.22

С. А. Глухов, А. И. Попов

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина,
г. Екатеринбург, Россия

МОБИЛЬНАЯ ВОЛНОВАЯ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯ

В работе рассматривается изобретение, разработанное на кафедре «Атомных Станций и Возобновляемых Источников Энергии». Оно относится к гидроэнергетике и может быть использовано для выработки электроэнергии от движения волн в больших водоемах, морях или океанах. Изобретение направлено на создание мобильного, простого по конструкции устройства, максимально использующего потенциальную и кинетическую энергию волн.

Ключевые слова: волна; электростанция; мобильность; гидроэнергетика.

S. A. Glukhov, A. I. Popov

Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

MOBILE WAVE POWER PLANT

The article tells about the invention developed at the Department of «Nuclear Energy and Renewable Energy Sources». It refers to hydropower and can be used to generate electricity from the movement of waves in large bodies of water, seas or oceans. The invention is directed to a mobile, easy-on design device, making the most of the potential and kinetic energy of the waves.

Key words: wave; power plant; mobility, hydropower.

ВВЕДЕНИЕ

Как известно, энергетический потенциал больших водоемов, морей и океанов достаточно велик. Изобретение, разработанное на кафедре «АСиВИЭ» относится к гидроэнергетике и может быть использовано

для выработки электроэнергии от движения волн.

В литературе известны многочисленные волновые энергетические установки, в том числе контурный плот Коккерелля, утка Солтера, пневматический

преобразователь Массуда, турбины Уэлса и др., использующие различные волновые эффекты и имеющие свои достоинства и недостатки.

ПРИНЦИП РАБОТЫ

Задачей изобретения является создание мобильного, простого по конструкции устройства, максимально использующего одновременно и кинетическую, и потенциальную энергию волн.

Указанная задача достигается тем, что в мобильной волновой электростанции, содержащей плавающую платформу с размещенной на ней волноприемной камерой, соединенной с воздухопроводом и воздушной турбиной, подключенной к электрогенератору. Согласно изобретению волноприемная камера выполнена в виде v-образного протяженного вдоль фронта волны тоннеля с боковыми стенками, наклонной нижней плоскостью на его входе и с подпружиненным клапаном на выходе узкой части тоннеля, соединенного с воздухопроводом, подключенным к хранилищу сжатого воздуха, выход которого соединен с воздушной турбиной. Платформа содержит полости, заполняемые водой для создания регулируемой плавучести, и соединена с опорой посредством гибких тросов.

Кроме того, в мобильной волновой электростанции хранилище сжатого воздуха выполнено в виде эластичных надуваемых баллонов, закрепленных на дне водоема. Волноприемная камера также оснащена на входе верхней наклонной плоскостью-козырьком с изменяющимся углом наклона и длиной под профиль крутизны входящей в тоннель волны.

Потенциальная энергия волны состоит из энергии положения гребня и ложбины волны, а также из энергии ее гидростатического давления. Кинетическая энергия волны включает в себя сложные горизонтальные перемещения гребня волны и энергию циркуляционного движения масс воды в волне.

Технический результат предлагаемого решения заключается в следующем:

- увеличена эффективность устройства за счет размещения на плавающей платформе v-образного протяженного вдоль фронта волны тоннеля, воспринимающего как кинетическую, так и потенциальную энергию волны, перемещающейся внутри тоннеля от его входной широкой до зауженной задней части;
- увеличена эффективность устройства за счет использования наклонной нижней плоскости и боковых стенок тоннеля, поднимающих амплитуду мелких волн и расширяющих диапазон использования устройства;
- увеличена эффективность устройства за счет регулирования положения плавающей платформы путем заполнения ее полостей забортной водой, что дает возможность приспособить устройство к текущей волновой обстановке;
- увеличена эффективность установки за счет использования эластичного надуваемого хранилища сжатого воздуха, размещаемого на дне водоема;

– увеличена эффективность за счет размещения плавающей платформы на тросах за опорой по направлению движения гребня волны, что позволяет устройству самоориентироваться на фронт движения волн.

Таким образом, изобретение предлагает максимальную адаптацию к интенсивности морского давления.

ОПИСАНИЕ ВОЛНОВОЙ МОБИЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Предложенное изобретение может найти применение в качестве универсального мобильного энергоагрегата, использующего энергию волн.

Волновая электростанция изображена на рис. 1 и рис. 2.

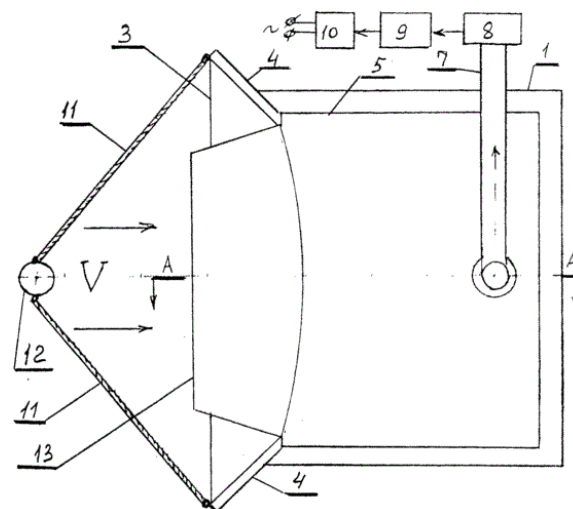


Рис. 1. Чертеж волновой электростанции, вид сверху

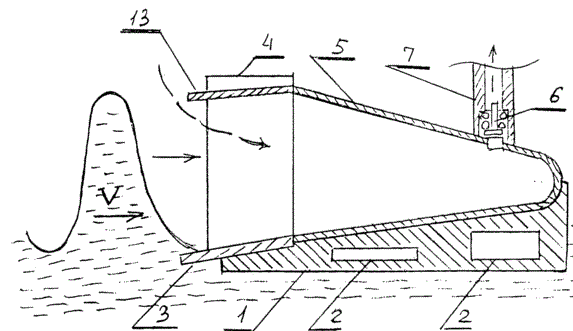


Рис. 2. Чертеж волновой электростанции, разрез по А-А на рис. 1

Волновая электростанция содержит платформу 1 с регулируемой плавучестью за счет заполнения водой ее полостей 2, волноприемную камеру, состоящую из наклонной нижней плоскости 3, боковых стенок 4, v-образного тоннеля 5, на выходе зауженной части которого закреплен подпружиненный клапан 6 внутри воздуховода 7, соединенного с подводным хранилищем 8 сжатого воздуха, а выход последнего подключен к воздушной турбине 9, нагруженной на электрогенератор 10. Платформа крепится канатами 11 за опору 12 по направлению движения волн V (показано сплошными стрелками), а вход тоннеля оснащен верхней наклонной плоскостью-козырьком 13, угол наклона и длина которого могут изменяться под

профиль крутизны входящей в тоннель волны и ограничивать ее амплитуду.

Хранилище сжатого воздуха крепится ко дну или оснащается дополнительными грузами. Оно выполнено в виде надуваемых эластичных баллонов, давление в которых возможно поддерживать на более высоком уровне за счет давления верхних слоев воды, поэтому его целесообразно располагать на больших глубинах [1].

Волновая электростанция работает следующим образом. Путем заполнения водой полостей 2 плавающей платформы 1 создается оптимальное ее подтопление (погружение) и наклон под действующую в настоящий период волновую обстановку. Это может осуществляться, например, дистанционно управляемыми электроклапанами, запускающими воду в полости, и вытеснением ее сжатым воздухом.

Волны воды V входят в v-образный тоннель 5, двигаясь по нему, вода с огромной скоростью сжимает воздух, который, преодолевая сопротивление подпружиненного клапана 6, поступает через воздуховод 7 в подводное хранилище сжатого воздуха 8. Для более надежного захватывания водой воздуха в тоннеле вход последнего незначительно закруглен по отношению к прямой линии движения фронта волны. Тоннель целесообразно разбить вертикальными перегородками на секции, не доходящие до конца его зауженной части, чтобы обеспечить перетекание воздуха между секциями для его подачи через клапан 6 в воздуховод 7. Воздушная турбина 9 и генератор 10 могут располагаться на платформе 1 или на берегу, причем хранилище 8 и турбина 9 также связаны воздухопроводом. Если генератор расположен на платформе, то электроэнергия для береговых потребителей подается по кабелю.

Наклонная нижняя, примерно под углом 30° , плоскость 3 позволит поднять по амплитуде волны малых размеров, что увеличивает диапазон используемых волн и повышает эффективность работы устройства.

Аналогично, боковые стенки 4 волноприемной камеры собирают волны за пределами ширины платформы и при их дальнейшем движении к сужающему конусу боковых стенок амплитуда волн возрастает, что также увеличивает эффективность предлагаемого устройства.

После прохождения гребня волны вода, попавшая в v-образный тоннель, выливается, в тоннель поступает воздух, и работа устройства циклично повторяется.

Волны имеют разный профиль, как близкий к синусоидальному, так и с крутым передним фронтом. Регулируя длину и угол наклона верхней плоскости-козырька 13 представляется возможность подстраиваться под профиль крутизны входящей в тоннель волны и ограничить ее амплитуду.

На лопасти-козырьке 13 или при входе волны в тоннель 5 может быть установлена вертикальная труба для поступления воздуха, содержащего меньшее количество водных брызг, попадающих вместе с нагнетаемым воздухом в воздуховод 7.

Крепление платформы 1 канатами 11 к опоре 12 позволяет самоориентироваться устройству на направление движения волн при их незначительном отклонении от установленного уровня. Если направление движения волн изменилось существенно, установку платформы на новое направление производят поворотом опоры 12.

В качестве подводных хранилищ сжатого воздуха может быть использовано различное резервуарное оборудование [2].

Волновые энергетические установки классифицируют по числу степеней преобразования энергии: одно-, двух-, трех-, четырех- и пятиступенчатые системы. Одноступенчатая система непосредственно преобразует волновую энергию в электрическую, например, используя пьезоэлектрический эффект.

Чем меньше ступеней преобразования, тем выше КПД за счет уменьшения потерь. Известно, что суммарный КПД сложных систем определяется перемножением КПД каждой ступени преобразования. Предлагаемая волновая электростанция имеет две ступени преобразования и будет отличаться высоким КПД.

Кроме того, сравнительно простая конструкция обеспечивает минимальную материалоемкость на единицу извлекаемой энергии.

Также техническим преимуществом предлагаемого устройства является его мобильность. Электростанция может быть отбуксирована в зону, где возникла необходимость в обеспечении дополнительной электроэнергии, при этом в качестве опоры 12 может использоваться судно или другая заякоренная конструкция [3].

Хотелось бы акцентировать внимание на том, что данная установка была отмечена на государственном уровне.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Котляр П. Канадцы придумали как хранить издержки воды под водой. [Электронный ресурс] // Электронное периодическое издание газета.ru. - М., 2014, URL: www.gazeta.ru/science/2014/07/12.shtin1 (дата обращения: 4.10.2016)
2. Газгольдеры для биогаза, биогазовые установки. ЗАО «Пензенский завод нефтегазового оборудования» [Электронный ресурс]: офиц. Сайт – [Пенза]. - режим доступа: www.penznego.ru, свободный. - Загл. с экрана (дата обращения: 4.10.2016)
3. Патент РФ № 2015108960/06, 13.03.2015. Щеклеин С.Е., Попов А.И. Мобильная волновая электростанция // Патент России №2580251. 2015.

УДК 621.175

К. А. Безбородов, А. С. Колпаков

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина,
г. Екатеринбург, Россия

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЫЛЕОЧИСТКИ В ВИХРЕВОМ ЦИКЛОНЕ

Настоящая работа посвящена исследованию процесса пылеочистки потока в циклонно-вихревых агрегатах, в частности в вихревом пылеуловителе, с целью применения результатов моделирования для проектирования и совершенствования системы пылеочистки.

Ключевые слова: вихревой поток; исследование численным методом вихревого циклона; распределение давления в пылеуловителе.

К. А. Bezborodov, A. S. Kolpakov

Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

SIMULATION OF THE DEDUSTING PROCESS IN THE VORTEX DEVICE

The present work is devoted to research of dust cleaning flow into the cyclone-vortex assembly process, in particular in the whirling dust collector, in order to use the simulation results to design and improve the dedusting system.

Key words: vortex flow; study numerically the vortex of the cyclone; pressure distribution in the baghouse.

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия развитие техники происходит в направлении повышения энергоэффективности технологических устройств, главной характеристикой которых должны быть высокие удельные показатели работы во всем диапазоне требуемых эксплуатационных режимов. Их создание невозможно без наличия технологических устройств, главной характеристикой которых должны быть высокие удельные показатели работы. С одной стороны, это позволяет добиться высокой производительности с помощью аппарата меньших размеров, что дает как прямое снижение энергозатрат, так и улучшение массо-габаритных характеристик, а, следовательно, экономию материалов и энергии при производстве аппарата. С другой стороны, повышение удельной эффективности работы агрегатов выгодно с точки зрения снижения эксплуатационных затрат.

Во многих отраслях промышленности широко распространен такой класс технологических устройств как теплообменники смешивающего типа.

Для теплообменных аппаратов повышение удельной эффективности работы не может быть достигнуто за счет увеличения быстроходности, как для движущихся механизмов. Поэтому для увеличения производительности необходима разработка принципиально новых конструкций. Из существующих аппаратов максимальную удельную эффективность имеют устройства с активными гидрогазодинамическими режимами – циклонные и вихревые [1–3].

Анализ [4, 5] их использования на предприятиях страны показал, что по производственным характеристикам они заметно превосходят устройства других типов аналогичного назначения.

Важной особенностью циклонно-вихревых устройств является зависимость эффективности их работы от конструкции и режима эксплуатации [6, 7]. Удачно сконструированный вихревой аппарат, работающий в оптимальных режимах, обеспечивает высокую эффективность процесса, увеличивает полноту его протекания, позволяет экономить ресурсы и понижает количество отходов, тем самым дополнительно обеспечивая как прямую, так и косвенную защиту окружающей среды.

По этой причине важным условием использования вихревых устройств является определение оптимальных конструктивных и режимных характеристик работы аппаратов. Это невозможно без комплексного изучения проходящих там сложных гидро-газодинамических и тепло-массообменных процессов с помощью компьютерного моделирования, открывающего возможность анализа расчетной модели аппарата и разработки рекомендаций по дальнейшему усовершенствованию его конструкции [8–10].

Настоящая работа посвящена исследованию закрученных потоков в циклонно-вихревом аппарате – вихревом пылеуловителе, с целью последующей трансформации модели для ее применения при анализе работы вихревого конденсатора.

ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ ДЛЯ АНАЛИЗА

К устройствам, в которых формируется вихревое движение среды, относятся центробежные, циклонные, циклонно-вихревые и вихревые камеры, вихревые трубы, циклоны и гидроциклоны, вихревые сепараторы, вихревые топки и камеры сгорания и т. д. Общим для них является наличие рабочего участка (как правило, цилиндрической или конической формы) и завихрителей потока.

В современных высокоэффективных циклонах, в конструкции которых учтены особенности улавливаемой пыли, удалось существенно повысить общую и фракционную эффективность очистки.

В этой работе рассматривается построение простой геометрической модели циклона, наложение на нее конечно-элементной сетки и моделирование вихревых процессов в *ANSYS Fluent*. В качестве рабочего тела используется поток воздуха, загрязненный пылью.

Целью исследования является определение параметров потоков смешивающихся сред – полей скоростей и температур в упрощенной геометрической модели вихревого устройства. Геометрия объекта показана на рис. 1 и 2.

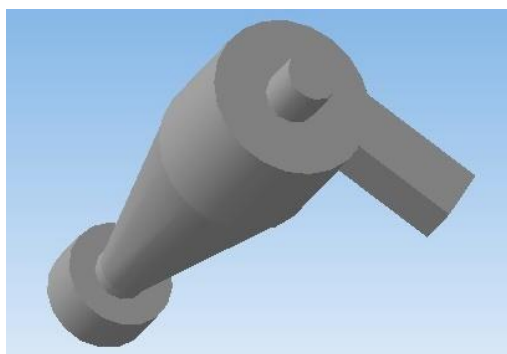


Рис. 1

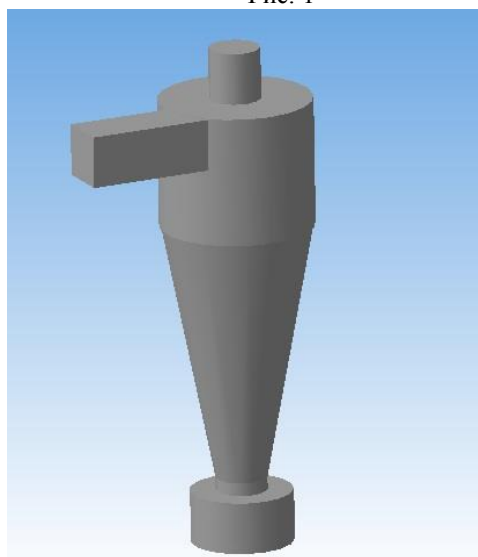


Рис. 2

После построения модели были заданы параметры разделяющихся сред, начальные и граничные условия. Турбулентность моделировалась с помощью широко применяемой при решении прикладных задач *k-ε* модели турбулентности; для теплообмена использовалась модели тепловой энергии. Модель тепловой энергии адаптирована к анализу потоков с низкими скоростями, которые характерны для устройств смешивающего типа.

Параметры задачи: количество расчетных ячеек составило около 20000. Модель турбулентности – *k-ε*. Течение рассчитывалось с учетом действия силы тяжести. Использовалась модель однофазного течения

с непрерывным распределением среды в объеме устройства.

В задаче учитывались: турбулентный характер течения, конвективный теплообмен, кавитационный массоперенос. Расход воздуха $0,27 \text{ м}^3/\text{с}$; температура воздуха 323 К ; массовый расход пыли $0,001 \text{ кг/с}$; мин. диаметр частицы пыли 1 мкм ; макс. диаметр частицы пыли 300 мкм ; плотность пыли 2100 кг/м^3 .

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для исследования данного объекта численным методом был выбран пакет программы *ANSYS R-15 "Fluent"*. Данный пакет позволяет проанализировать траектории движения теплоносителей, их распределение по сечению и высоте завихрителя. Также возможно построение полей скоростей, давлений и температур объектов разделения и осаждения.

На начальном этапе исследования рассматривалось взаимодействие воздуха и пыли при вихревом движении в закрученном потоке. Смоделированная установка предназначена для эффективной очистки воздуха от включений пыли разного диаметра и может быть использована, в системах вентиляции и подготовки воздуха производственных процессов различного назначения, вентиляции зданий и сооружений [7, 8].

Пылевоздушная масса со взвешенными в ней частицами пыли через входной патрубок поступает в цилиндрическую часть циклона и совершают движение сверху вниз по наружной спирали. Под действием центробежной силы фракции взвешенной пыли отделяются и по стенкам циклона перемещаются вниз в сборный конус. Обычно в циклонах центробежное ускорение в несколько сотен, а то и в тысячу раз больше ускорения силы тяжести, поэтому даже весьма маленькие частицы пыли не в состоянии следовать за газом, а под влиянием центробежной силы движутся к стенке. Собранная пыль движется вдоль стенки по спирали вниз в пылеуловитель. Чистый воздух по мере движения сверху вниз частично меняет свое направление, поступая в осевую зону циклона. Чистый воздух выводится в воздухопровод для очищенного воздуха сверху или сбоку циклона, частицы пыли вследствие своей инерционности этого сделать не успевают и попадают в пылеулавливающее устройство.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Расчеты в пакете программ *ANSYS* позволили визуализировать распределение пылевоздушной массы, а также параметров смешиваемых сред в объеме вихревого устройства (Рис. 3–5).

В результате расчета были получены профили скоростей и температур теплоносителей во всех точках расчетной области. Сопоставление результатов расчета с экспериментальными данными по определению гидравлического сопротивления, оказываемого пылевоздушному потоку устройством, а также исследованиями структуры потоков, как функции рас-

пределения времени пребывания, показало удовлетворительное совпадение. Это позволяет сделать вывод о применимости численного моделирования при анализе работы вихревого устройства.



Рис. 3

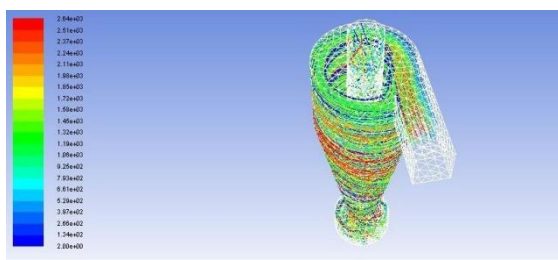


Рис. 4

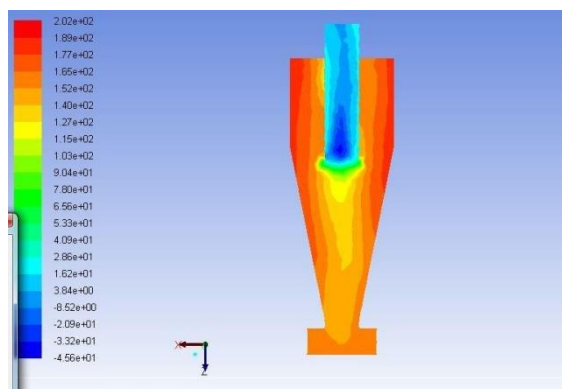


Рис 5

При анализе структуры закрученных потоков можно увидеть, как меняется скорость и температура воздушного потока, загрязненного пылью, а также распределение температуры внутри кожуха аппарата.

Красная область – зона высокого давления, области прилипания пыли к стенке циклона синяя область – зона пониженного давления в области выхода очищенного воздуха. Присутствует разделение пока загрязненного воздуха на составляющие, т. е. на потоки очищенного воздуха и взвеси пыли.

Результатом данного эксперимента является то, что мы можем наблюдать созданную модель вихревого течения. Данная компьютерная модель подтверждает появление вихревого потока при заданной конфигурации. Опираясь на полученные данные, можно поставить следующую цель исследования:

изучить возможность применения данной модели для детального анализа процесса пылеочистки [11, 12].

Таким образом, применение программы ANSYS позволяет создавать газодинамические модели статического центробежного пылеуловителя, получать полную информацию о протекающих процессах и усовершенствовать циклон, изменяя конструктивные и технологические параметры. Это, в свою очередь, позволяет существенно сократить время на проектирование и объем дорогостоящих физических экспериментов

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ветошин А.Г. Процессы и аппараты пылеочистки [Текст] / А.Г. Ветошин. - Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2005. – 210 с.
2. Карпов С.В. Высокоэффективные циклонные устройства для очистки и теплового использования газовых выбросов [Текст] / С.В. Карпов, Э.Н. Сабуров; под ред. Э. Н. Сабурова. – Архангельск: Изд-во Архангельского гос. техн. ун-та, 2002. – 504 с.
3. Коузов П. А. Сравнительная оценка циклонов различных типов [Текст] / П. А. Коузов // Обеспыливание в металлургии: сборник / под ред. Я. А. Штромбергера. – М., 1971. – С. 185–196.
4. Ладыгичев М. Г. Зарубежное и отечественное оборудование для очистки газов: справ. изд. [Текст] / М. Г. Ладыгичев, Г. Я. Бернер. – М.: Теплотехник, 2004. – 694 с.
5. Батурин О.В. Расчет течений жидкостей и газов с помощью универсального программного комплекса. Часть 2. Построение расчетных моделей в препроцессоре Gambit/ О.В. Батурин, И.И. Морозов, В.Н. Матвеев – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2008. – 125с.
6. Алексеев С.В., Куйбин П.А., Окулов В.Л. Введение в теорию концентрированных вихрей. Новосибирск: Институт теплофизики СО РАН.
7. Бояршинов Б.В., Терехов В.И. О соотношении тепловых потоков на поверхности при наличии фазового перехода // Изв. СО АН СССР. – 1986. – № 4. Серия тех. наук: Вып. 1. – С. 25-31.
8. Бреев И.М. Применение вихревых генераторов холода в авторефрижераторах // Холодильная техника. – 1992. – № 7-8. – С. 11-12.
9. Буглаев В.Т., Казаков В.С. Теплоотдача при поперечном обтекании труб насыщенным воздухом // Изв. вузов. Энергетика. – 1971. – № 4. – С. 79-83.
10. Будов В.М., Кирьянов В.А., Шемагин И.А. О волнах поверхности конденсатного ручья внутри горизонтальных труб // Изв. вузов СССР. Энергетика. – 1986. – № 7. – С. 69-74.
11. Берго Б.Г. и др. Исследование вихревого сепаратора в составе природного газа // Вихревой эффект и его промышленное применение: Мат-лы П Всесоюз. науч.-техн. конф. — Куйбышев, 1976. — С. 146-154.
12. Бойко Л.Д., Кружилин Г.Н. Теплоотдача при конденсации пара в трубе // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1966. -№ 5. – С. 113.

УДК 621.1.016

П. С. Кузнецов, Ю. М. Голдобин

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина,
г. Екатеринбург, Россия

О КИНЕТИКЕ ГОРЕНИЯ КАПЕЛЬ РАСПЫЛЕННОГО ЖИДКОГО ТОПЛИВА

На основе кинетического уравнения и полученной скорости горения одиночной капли определены текущая и начальная функции распределения частиц по радиусам для автомодельного режима горения. Скорость горения капли получена для случая кондуктивного подвода теплоты к поверхности капли от фронта горения. Получены выражения для расчета доли несгоревшего к текущему моменту времени топлива и автомодельные параметры, необходимые для расчетов горения полидисперсных систем капель.

Ключевые слова: горение; жидкое топливо; капли; полидисперсность; функция распределения; скорость горения; автомодельные параметры.

P. S. Kuznetsov, Y. M. Goldobin

Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

ON THE KINETICS OF COMBUSTION OF SPRAYED LIQUID FUEL DROPS

The current and the initial functions of distribution of the particle radius for the self-burning mode are determined on the base of the kinetic equation and the resulting burning rate of a single drop. Droplet burning rate was obtained for the case of conductive heat supply to the drop surface from the combustion front. The expressions to calculate the percentage of unburned fuel to the current time and self parameters required for the calculation of combustion polydisperse systems of drops are obtained.

Key words: combustion; liquid fuel; drops; polydispersity; distribution function, combustion rate, self parameters.

Распыленное топливо представляет собой полидисперсную систему капель, поэтому кинетика горения должна рассматриваться для усредненных по функции распределения характеристик системы.

Полидисперсность капель при описании процесса горения будем учитывать на основании кинетического уравнения для функции распределения частиц по радиусам $f(r_s, t)$ [1, 2]

$$\frac{\partial f(r_s, t)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial r_s} [f(r_s, t) * W(r_s, t)] = 0, \quad (1)$$

где $W(r_s, t) = \frac{dr_s}{dt}$ - скорость горения единичной капли, r_s - радиус капли, t - время.

Для уравнения (1) выполняются соотношения

$$dN(t) = N_0 f(r_s, t) dr_s; f(r_s, 0) = f_0(r_s) \\ \int_0^\infty f_0(r_s) dr_s = 1, \quad (2)$$

где $N(t)$; N_0 - текущее и полное (начальное) число частиц в начальный момент времени. $f_0(r_s)$ - начальная функция распределения частиц по радиусам.

Для нахождения функции $f(r_s, t)$ из уравнения (1) необходимо знать скорость горения единичной капли $W(r_s, t)$, которая может быть получена из квазистационарной теории диффузионного горения капли. Принята следующая схема процесса тепломассообмена каплей, вброшенных в поток высокотемпературной среды, содержащей окислитель. Капли не дробятся, не взаимодействуют друг с другом, имеют нулевую относительную скорость и самовоспламеняются. Вокруг капли устанавливается узкая сферическая зона фронта

горения. Часть теплоты реакции горения направляется к поверхности капли и затрачивается на испарение капли и прогрев паров топлива от температуры поверхности до температуры воспламенения, другая направлена на прогрев газов, находящихся снаружи фронта горения [3, 4].

В данной работе для определения скорости горения использован кондуктивный перенос теплоты на испарение и горение капли жидкого топлива, предложенный в работе [4].

В узкой зоне диффузионного пламени скорость реакции неизмеримо больше скорости диффузии, поэтому можно считать, что в зоне горения (фронте пламени) весь окислитель расходуется, и его концентрация равна нулю ($C_r = 0$), все пары топлива тоже расходуются, и их концентрация также равна нулю ($C_l = 0$). Можно считать, что зона горения очень мала при $r = r_f$.

В такой постановке задачи можно принять, что в пространстве между каплями и фронтом горения ($r_s < r < r_f$) находятся пары топлива, которые нагреваются от температуры поверхности капли T_s до температуры воспламенения, которая при горении быстро даёт температуру фронта пламени T_f , т.е. можно считать, что нагрев топлива происходит до температуры T_f . За фронтом пламени ($r > r_f$) происходит кондуктивная передача теплоты на нагрев среды, окружающей каплю, в которой находится окислитель и продукты горения, разбавленные инертным газом.

Из уравнений баланса энергии для областей ($r_s < r < r_f$) и ($r > r_f$) получается выражение для расчета массовой скорости горения, из которого получена скорость изменения радиуса капли. Её можно представить в виде произведения двух функций, одна из которых зависит только от радиуса капли $\Omega(r_s)$, а другая только от времени $\omega(t)$

$$W(r_s, t) = \Omega(r_s) \times w(t), \text{ где } \Omega(r_s) = \frac{1}{r_s}; \quad (3)$$

$$w(t) = - \left\{ \frac{\lambda_1}{\rho_1 c_1} \ln \left[1 + \frac{c_1}{L} (T_f - T_s) \right] + \frac{\lambda_2}{\rho_1 c_2} \ln \left[1 + \frac{c_2 (T_f - T_{cp})}{Q_R - L - c_1 (T_f - T_s)} \right] \right\},$$

где λ_1, λ_2 – коэффициенты теплопроводности среды до и после фронта горения; c_1, c_2 – удельная теплоемкость среды до и после фронта горения; ρ_1 – плотность жидкого топлива; L – теплота испарения топлива; Q_R – теплота сгорания, r_s – радиус капли, T_f – температура фронта горения, T_s – температура поверхности капли.

Представление скорости горения в виде произведения двух функций (3) позволяет представить функцию распределения частиц по радиусам $f(r_s, t)$ также в виде суммы ряда, состоящего из произведения двух функций, зависящих только от координат и временной частей [2]. Начиная с некоторого момента времени $f(r_s, t)$ будет определяться только первым членом ряда, то есть наступает своеобразный регулярный режим горения, который по времени будет основным. Тогда $f(r_s, t)$ будет представлена уравнением

$$f(r_s, t) = A \Omega^{-1}(r_s) \exp[-a \int \Omega^{-1}(r_s) dr_s] \times \exp \left[a \int_0^t \omega(t) dt \right], \quad (4)$$

где a – константа разделения, A – постоянная интегрирования.

Подстановка в (4) конкретного вида функции $\Omega(r_s)$ из (3) даёт

$$f(r_s, t) A r_s \exp \left[-\frac{a}{2} r_s^2 \right] \exp \left[a \int_0^t \omega(t) dt \right] \quad (5)$$

Полагая, что в условиях интенсивного горения температура поверхности капли T_s близка к температуре кипения и пренебрегая теплотой, затраченной на прогрев капли, будем считать, что температура поверхности капли при её испарении постоянна и равна температуре кипения.

Температура пламени T_f в общем случае зависит от температуры среды T_{cp} , концентрации окислителя в газовой среде, коэффициента диффузии окислителя и других параметров. Однако, расчёты показывают, что разность температур ($T_f - T_{cp}$) при горении в воздухе, разбавленном инертными газами составляет до 90 % от максимально возможной ($T_a - T_{cp}$), где T_a – адиабатная температура. Это означает, что температура T_f незначительно отличается от теоретической T_a и может быть определена через нее, т.е. её можно считать известной и постоянной, поскольку она изменяется в процессе горения слабо. При постоянных средних коэффициентах теплопроводности и удельной теплоемкости временная часть скорости горения $\omega(t)$ будет зависеть только от температуры среды T_{cp} .

Используя (5), можно ввести долю несгоревшего топлива $y(t)$, как отношение несгоревшей массы капель $M_k(t)$ к их начальной массе M_{k0}

$$y(t) = \frac{M_k(t)}{M_{k0}} = \exp \left[a \int_0^t \omega(t) dt \right] \quad (6)$$

Полученные соотношения позволяют получить в дальнейшем усредненные характеристики полидисперсной системы: среднюю поверхность, объем, температуру среды и т. д.

Из уравнения получим дифференциальное уравнение для расчёта доли несгоревшего к данному моменту времени топлива y

$$\frac{dy}{dt} = -a \omega(t) y \quad (7)$$

Для его решения необходимо связать температурный напор ($T_f - T_{cp}$), входящий в $\omega(t)$, с долей несгоревшего топлива y , что получается из уравнения теплового баланса системы капель, впрыснутых в объем, с высокотемпературной средой ($T_{cp,0} >$ температуры воспламенения капель), содержащей окислитель. Предполагается, что горение паров топлива идёт до образования двуокиси углерода, поэтому в нагреваемой среде содержатся кислород и азот воздуха совместно с продуктами горения. Теплота реакции горения расходуется на испарение капель топлива, подогрев паров топлива от температуры поверхности капель T_s до температуры фронта горения T_s , с добавлением теплоты, поступающей от продуктов сгорания в окружающую среду из фронта пламени.

Уравнение теплового баланса принимает вид

$$\left(\alpha M_K C_K + \alpha M_{N_2} C_{N_2} + M_{пг} C_{пг} \right) \frac{dT_{cp}}{dt} = \frac{dM_T}{dt} [Q_R - L - C_{п1} (T_f - T_s) + C_{пг} (T_f - T_{cp})] \quad (8)$$

где α – коэффициент избытка воздуха; $M_K, M_{N_2}, M_{пг}$ – массы кислорода, азота, продуктов сгорания и топлива; $C_K, C_{N_2}, C_{пг}$ – теплоемкости кислорода, азота и продуктов сгорания.

К этому уравнению можно добавить потери тепла в окружающую среду.

Вводя обозначения

$$\mu = \frac{M_{T0}}{M_{N_2}}, \quad C_{пг} = \frac{\alpha m_K}{m_{N_2}} C_K + \frac{m_{пг}}{m_T} C_{пг},$$

где $m_T, m_K, m_{пг}$ – молекулярные массы топлива, кислорода и продуктов горения, и учитывая, что горят пары топлива, уравнение (8) для доли несгоревшего топлива y приводится к виду

$$\left[1 + \mu \frac{C_{пг}}{\alpha C_{N_2}} (1 - y) \right] dT_{cp} = \frac{\mu}{\alpha C_{N_2}} [\beta + C_{пг} (T_f - T_{cp})] dy \quad (9)$$

где $\beta = Q_R - L - C_{п1} (T_f - T_s)$ и $C_{п1}$ – теплоемкость паров топлива в области радиуса r ($r_s < r < r_f$).

Формула (9) связывает искомую температуру T_{cp} с долей несгоревшего топлива y .

Уравнения (3), (8), (9) позволяют численно решить задачу отрицательного выгорания топлива y и опреде-

лить температуру среды $T_{\text{ср}}$ в текущие моменты времени. Эта задача может быть решена в конечном виде, но с дополнительными упрощениями, ведущими к потере части информации по процессу горения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бувеч Ю.А. О кинетике массообмена полидисперсной системы частиц с окружающей средой. ПМТФ. 1966. N1.

2. Ясников Г.П. О кинетике автотермического режима испарения полидисперсной системы капель. ИФЖ. 1982. т.42. N2. С. 243-250.

3. Кумагаи С. Горение. М.: Химия. 1979. 255 с.

4. Хайкин Б.И. Гетерогенное горение Сб. Тепломассообмен в процессах горения. Черноголовка: 1980. С. 58-79.

УДК 621.472

К. С. Денисов, Л. Р. Хайретдинова, В. И. Велькин

Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ МАЛОМЕРНОГО ВОДНОГО ТРАНСПОРТА С ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЕМ НА ОСНОВЕ СОЛНЕЧНЫХ ФЭП

В работе представлены преимущества использования электрических двигателей для маломерного водного транспорта, по сравнению с топливными двигателями. Приведено одно из решений проблемы энергоснабжения систем с электрическими двигателями на базе ФЭП.

Ключевые слова: маломерный водный транспорт; экология; фотоэлектрический преобразователь; топливный двигатель; энергоснабжение; электрический двигатель.

K. S. Denisov, L. R. Khairatdinova, V. I. Velkin

Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

THE EXPERIENCE OF ELECTRIC ENGINE USE FOR THE SMALL-SIZE WATER TRANSPORT WITH SOLAR CELLS ENERGY SUPPLY

The advantages of using the electric engines for the small-sized water transport in comparison with fuel engines are presented. One of the solutions to the problem of energy supply of the systems with electric engines on the basis of solar panels is given.

Keywords: small-sized water transport, ecology, solar panels, fuel engine, electricity, electric engine.

ВВЕДЕНИЕ

Широкое использование органических видов топлив и загрязнение окружающей среды приводят к необходимости поиска новых способов энергоснабжения маломерного водного транспорта. С другой стороны, законодательство ужесточает требования по сокращению вредных выбросов с отработавшими газами.

Маломерный водный транспорт может решить проблемы, связанные с загрязнением воздуха, в частности, благодаря использованию инновационных систем привода. Новые способы энергоснабжения двигателей все более ориентированы на электрификацию, что позволяет снизить выбросы вредных веществ. Однако на сегодняшний день бензиновые двигатели более широко распространены. Наибольшее негативное воздействие оказывают отработавшие газы (ОГ) топливных двигателей. Токсичными компонентами отработавших газов бензиновых двигателей являются оксид углерода (CO), оксиды азота (NO_x), углеводороды (C_nH_m), а в случае применения этилированного бензина – свинец (рис. 1) [1].

CO_2 – двуокись углерода (углекислый газ). Углекислый газ CO_2 уменьшает слой атмосферы, который защищает землю от ультрафиолетовых лучей, испускаемых солнцем.

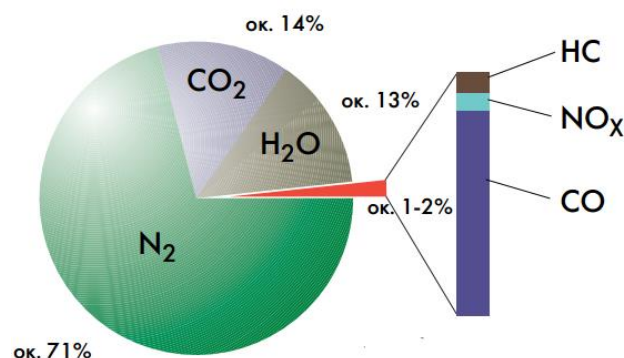


Рис. 1. Состав отработавших газов бензиновых двигателей

CO – окись углерода. Возникает в результате неполного сгорания содержащих углерод топлив. Газ не

имеет цвета и запаха, взрывоопасен и очень ядовит. При действии на человека СО вызывает головную боль, головокружение, быструю утомляемость, раздражительность, сонливость, боли в области сердца. Способен вызвать смерть человека уже при относительно малой концентрации в воздухе.

NO_x – оксиды азота, образуются при сгорании топлива в двигателе под действием высоких температур и давлений и наличии избытка кислорода. Некоторые из оксидов азота токсичны. Оксиды азота при попадании в организм человека соединяются с водой. При этом они образуют в дыхательных путях соединения азотной и азотистой кислоты. Оксиды азота раздражающе действуют на слизистые оболочки глаз, носа, рта.

SO_2 – двуокись серы. Это бесцветный негорючий газ с резким запахом. Двуокись серы вызывает заболевания дыхательных путей, однако в ОГ ее концентрация обычно очень мала. Снижение выброса SO_2 достигается уменьшением ее содержания в топливе.

H_mC_n – углеводороды. Появляются в отработавших газах в результате неполного сгорания углеводородного топлива. Углеводороды могут проявляться в различных формах (например, C_6H_6 , C_8H_{18}), и их действие на организм человека различно. Некоторые раздражают органы чувств, другие вызывают развитие злокачественных опухолей (например, бензол) [1].

ПРЕИМУЩЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ

В последние годы транспортные средства с электроприводом обратили на себя внимание в качестве одного из решений проблем загрязнения окружающей среды.

Электрические двигатели, по сравнению с бензиновыми, обладают целым рядом преимуществ, основными из которых являются:

- экологичность;
- отсутствие топлива, моторных масел;
- отсутствие вредных веществ в отработавших газах;
- бесшумность;
- высокий КПД $\approx 90\text{--}95\%$ (ДВС $22\text{--}42\%$);
- низкая стоимость 1 км пробега.

Одним из важных аспектов является низкая степень вредного воздействия на окружающую среду по сравнению с бензиновыми двигателями, которые часто используются в водном транспорте.

Несмотря на явные преимущества, область применения электрических транспортных средств ограничена вследствие малого пробега на одной заправке, что обуславливается малой энергоемкостью существующих накопителей электрической энергии.

Решение подобной задачи с помощью фотоэлектрических преобразователей будет актуально на различных судах, в том числе катерах и лодках с электрическим двигателем. Как правило, такие системы с фотоэлектрическими преобразователями используются совместно с аккумуляторными батареями для обеспечения стабильного энергоснабжения потребителей в лю-

бое время суток и вне зависимости от суточного и погодного изменения интенсивности солнечного излучения. Фотоэлектрическая система, помимо солнечных батарей, аккумуляторов и энергопотребителей, обычно содержит прибор электронного контроля, исключающий перезаряд аккумулятора и его глубокий разряд.

СИСТЕМА ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ МАЛОМЕРНОГО ВОДНОГО ТРАНСПОРТА НА БАЗЕ ФЭП

На кафедре АС и ВИЭ была спроектирована система электроснабжения маломерного водного транспорта на основе фотоэлектрической панели.



Рис. 2. Схема электроснабжения маломерного водного транспорта



Рис. 3. Внешний вид лодки с электродвигателем на основе солнечной фотоэлектрической станции

В результате был сделан вывод о том, что применение фотоэлектрических преобразователей для электроснабжения двигателя лодки целесообразно, т. к. позволяет преодолевать большие расстояния без дополнительной подзарядки АКБ. Кроме того, необходимо отметить, что системы с ФЭП по сравнению топливными моторами обладают рядом преимуществ, основным из которых является экологичность, т. к. использование возобновляемых источников энергии дает возможность свести выбросы CO_2 в атмосферу и загрязнение органическими маслами и продуктами горения практически к нулю.

Следующее преимущество – возможность применения на малых реках, где использование бензиновых двигателей ограничено по мощности или вообще запрещено. Лодки с бензиновыми двигателями создают достаточно сильную волну, которая подмывает берега

небольших рек, что приводит к падению деревьев в воду, заиливанию русла и т. д.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Выброс вредных веществ с отработавшими газами автомобильных двигателей: программа самообучения 230 / Фольксваген Групп Рус. – 27 с.
2. Алексеев А.В., Алексеева Д.А. Книга для подготовки судоводителей маломерных судов. Катер, моторная лодка. Районы плавания «ВП/ВВП». – Ярославль: Хистори оф Пипл, 2009. – 208 с.

3. Коротков В.С., Лежнев Л.Ю., Папкин Б.А., Шустров Ф.А. Анализ способов электроснабжения транспортных средств на базе тягового электропривода / В.С. Коротков, Л.Ю. Лежнев // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – №6. – с. 7-12.

4. Велькин В.И., Стариков Е.В., Завьялов А.С./ Расчет автономной фотоэлектрической системы электроснабжения для резервирования собственных нужд АЭС. Екатеринбург: УрФУ, 2014. – 27 с.

УДК 621.3

А. Д. Никитин, В. А. Бегалов

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина,
г. Екатеринбург, Россия

ОЦЕНКА ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ ПРИ МОДЕРНИЗАЦИИ СИСТЕМЫ ВОДООТВЕДЕНИЯ (НА ПРИМЕРЕ МО СРЕДНЕУРАЛЬСК)

Проводится анализ энергосбережения при модернизации системы водоотведения г. Среднеуральск. Выполнена оценка экономии энергии при внедрении частотно-регулируемого привода насосов на канализационных насосных станциях, по результатам расчета снижение энергопотребления составит 12 %. Выявлено, что при использовании частотно-регулируемого привода существует точка с минимальным энергопотреблением, при работе насоса только в этом режиме экономия энергии составит 25 %.

Ключевые слова: энергосбережение, система водоотведения, частотно-регулируемый привод, экономия энергии, модернизация.

A. D. Nikitin, V. A. Begalov

Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

EVALUATION OF ENERGY SAVING WHEN UPGRADING THE DRAINAGE SYSTEM (ON THE EXAMPLE OF THE SREDNEURALSK MUNICIPALITY)

Energy efficiency in the modernization of the sewerage system of Sredneuralsk city is analyzed. Estimation of energy saving with the introduction of variable frequency drive for the pumps at the sewage pumping stations is complemented. The calculation shows that the energy consumption reduction is 12 %. It was revealed that for the use of variable frequency drives there is a point with minimal power consumption. The operation of the pump in this mode only gives 25 % of energy saving.

Key words: energy saving, sewerage system, variable frequency drive, energy saving, modernization.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в г. Среднеуральск ведется интенсивное строительство новых жилых районов. Существующая система водоотведения, построенная в 1960-е годы, во-первых, имеет высокую степень износа и, во-вторых, имеет недостаточную пропускную способность с учетом нового строительства. В связи с этим проводится ее масштабная модернизация, включающая строительство новых очистных сооружений, замену насосов на канализационных насосных станциях (КНС) и прокладку новых канализационных коллекторов. В данной работе проводится оценка энергосбережения применительно к КНС.

Принципиально КНС представляет собой здание, разделенное на две части: приемный резервуар для стоков

и машинный зал. На верхнем (наземном) уровне КНС также есть комната для обслуживающего персонала. Кроме этого, на верхнем уровне установлены шкафы управления оборудованием КНС. В машинном зале (на нижнем уровне) установлены три насоса. Один из насосов является основным, он включается при наполнении приемного резервуара выше минимального уровня по сигналу от поплавкового датчика.

При большом объеме поступающих стоков (во время суточных максимумов), когда производительности основного насоса недостаточно, уровень в приемном резервуаре повышается, и включается второй насос. Один из насосов всегда находится в резерве. Резерв-

ный насос используется в случае выхода из строя основного или вспомогательного насосов, а также при переполнении приемного резервуара.

Таким образом, наработка насосов не одинаковая, основной насос работает в течение большого промежутка времени, а резервный практически не включается. Поэтому с определенной периодичностью изменяют функции насосов, при этом насос с наименьшей наработкой становится основным.

Суть модернизации КНС заключается в установке новых насосов марки «Grundfos», соответствующих требуемому расходу стоков и имеющих повышенный коэффициент полезного действия (КПД) по сравнению с существующими насосами марки «СМ», а также в применении частотно-регулируемого привода насосов, в автоматизации и диспетчеризации системы управления КНС.

Использование частотного регулирования приводов (ЧРП) насосов и устройств плавного пуска (УПП) для их запуска позволяет:

- существенно сэкономить потребляемую электроэнергию за счет оптимизации энергопотребления в соответствии с расходом стоков;
- значительно снизить затраты на ремонт и обслуживание насосного оборудования из-за уменьшения аварийных ситуаций, которые возникают при стандартных способах регулирования (защита двигателя от перегрузки, заклинивания вала и перегрева, защита инвертора от короткого замыкания и др.);

- увеличить срок службы насосного оборудования;
- повысить точность и оперативность поддержания необходимых технологических параметров в норме.

При использовании ЧРП и УПП возникает несколько вариантов схемы подключения насосов. Была использована схема, при которой основной насос подключается к частотному преобразователю, а вспомогательный и резервный насосы – каждый к отдельному устройству плавного пуска. Такая схема имеет наибольшую простоту и надежность.

ОЦЕНКА ЭКОНОМИИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЧРП

Произведена оценка экономии электрической энергии при использовании ЧРП насосов на примере КНС № 9. Реальный суточный график стоков представлен на рис. 1. В течение года суточный график стоков изменяется незначительно.

Для расчета энергопотребления насоса использовалась программа для подбора оборудования Grundfos [1], в которой строятся три кривые: характеристика насоса, кривая энергопотребления насоса и характеристика трубопровода, которая автоматически вычисляется по заданному давлению, потерям напора в трубопроводе и расходу стоков. Точка пересечения характеристик насоса и трубопровода – рабочая точка – соответствует режиму, в котором будет работать насос. Для рабочей точки программа выводит параметры, в том числе – энергопотребление.

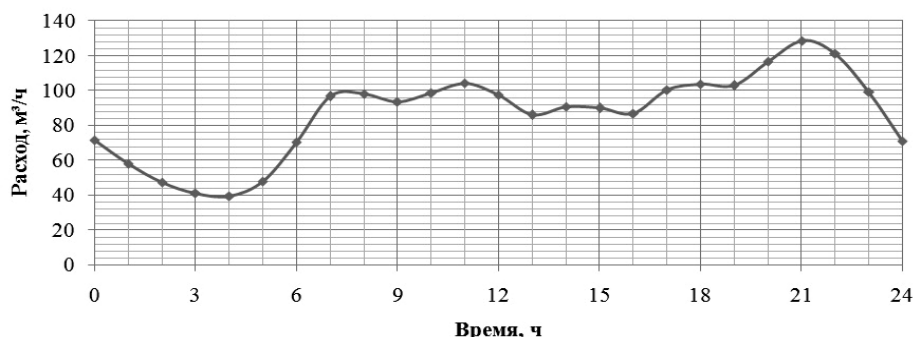


Рис. 1. Суточный расход стоков на КНС № 9

На рис. 2,а показаны характеристики для насоса без ЧРП. В этом случае насос будет запускаться периодически, при наполнении приемного резервуара. Суточное энергопотребление для расхода стоков, соответствующих рис. 1, составляет 315 кВт·ч при суммарном расходе стоков за сутки 2090 м³.

На рис. 2,б показаны характеристики насоса при использовании ЧРП. В данном случае для расчета энергопотребления использовались средние за час расходы стоков, для каждого расхода определялась рабочая точка и удельное энергопотребление, затем рассчитывалось потребление энергии за каждый час и производилось его суммирование. В результате суточное энергопотребление насоса с ЧРП составляет 277 кВт·ч.

В ходе расчетов было установлено, что при использовании ЧРП энергопотребление изменяется нелинейно.

На рис. 3 показана зависимость удельного энергопотребления от расхода стоков. Как видно, при снижении расхода энергопотребление снижается, но при малых расходах оно резко возрастает; существует точка с минимальным энергопотреблением. Поэтому целесообразно не осуществлять регулирование работы насоса в зависимости от расхода стоков, а запускать насос периодически (при переполнении приемного резервуара) в режиме минимального энергопотребления. Суточное потребление энергии в этом случае для КНС № 9 составляет 238 кВт·ч.

В таблицах 1 и 2 приведены результаты расчетов годовой экономии энергии, годового экономического эффекта в ценах 2015 г. и снижения энергопотребления относительно варианта без применения ЧРП.

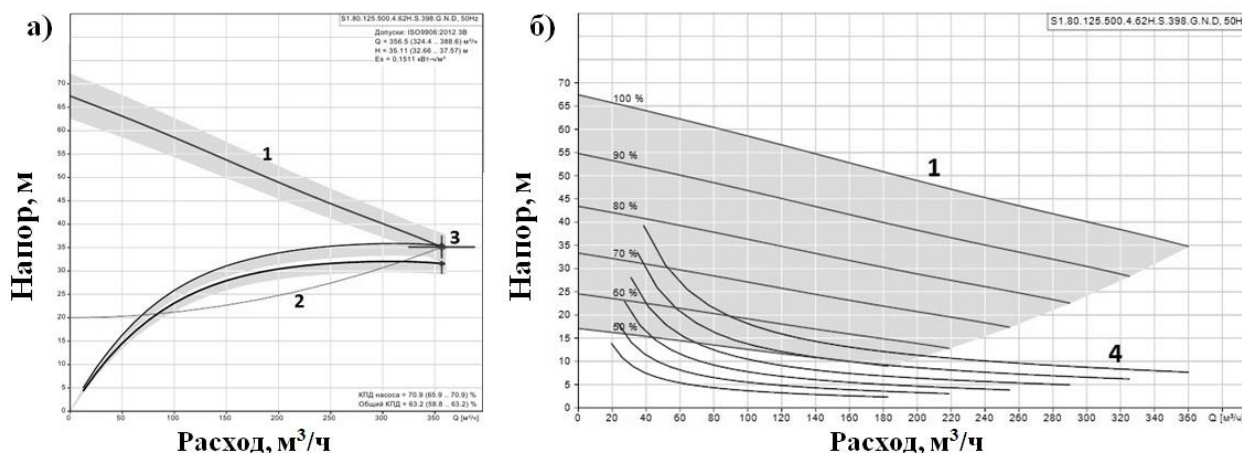


Рис. 2. Характеристики насоса и трубопровода: а – без ЧРП, б – с ЧРП
1 – характеристика насоса, 2 – характеристика трубопровода, 3 – рабочая точка,
4 – кривая удельного энергопотребления

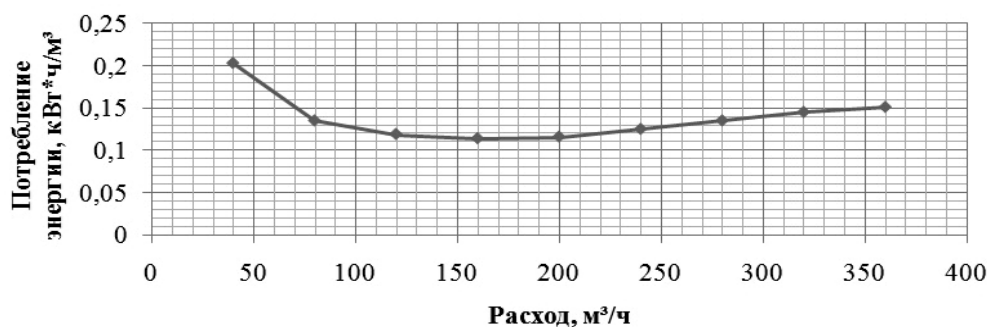


Рис. 3. Зависимость удельного энергопотребления от расхода стоков

Таблица 1

Результаты оценки энергосбережения при частотном регулировании привода в зависимости от расхода стоков

Показатель	Значение
Годовая экономия энергии, кВт·ч	14 089
Годовой экономический эффект, тыс. руб.	71,5
Снижение потребления энергии при внедрении, %	12,2

Таблица 2

Результаты оценки энергосбережения при работе насоса в периодическом режиме с минимальным потреблением энергии

Показатель	Значение
Годовая экономия энергии, кВт·ч	28 215
Годовой экономический эффект, тыс. руб.	143,3
Снижение потребления энергии при внедрении, %	24,5

ВЫВОДЫ

Таким образом, проведена оценка экономии энергии при внедрении частотно-регулируемого привода в рамках модернизации КНС. При частотном регулировании в соответствии с расходом стоков снижение потребления энергии составит 12,2%, при работе насоса в режиме минимального энергопотребления – 24,5%. Однако энергосбережение при модернизации КНС – это комплексный процесс. Снижение потребления энергии достигается также за счет установки нового оборудования, имеющего повышенный КПД, и его оптимального подбора, в результате чего достигается максимально возможная эффективность работы. Кроме этого, применение устройств плавного пуска снижает потребление энергии при запуске насосов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Grundfos S1.80.125.500.4.62H.S.398.G.N.D. [Электронный ресурс]. URL: <http://product-selection.grundfos.com/> (дата обращения 21.09.16)

УДК 683.9

А. Д. Никитин, С. Е. Щеклеин

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина,
г. Екатеринбург, Россия

И. В. Кузнецов

НП «Развитие системы печей Кузнецова», г. Екатеринбург, Россия

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МНОГОКОЛПАКОВЫХ ПЕЧЕЙ ДЛЯ ОТОПЛЕНИЯ ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

Рассматривается перспектива использования многоколпаковых печей для отопления децентрализованных потребителей. Проведен сравнительный анализ эффективности современных дровяных печей и котлов длительного горения. Представлена методика для определения эффективности печи по прямому и по обратному балансу. По результатам экспериментальных испытаний эффективность многоколпаковых печей составляет 95%, что открывает широкие возможности для их повсеместного применения.

Ключевые слова: печное отопление; дровяное отопление; эффективность печей; печи Кузнецова; система свободного движения газов.

A. D. Nikitin, S. E. Shcheklein

Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

I. V. Kuznetsov

NP "Kuznetsov stove systems development", Ekaterinburg, Russia

PROSPECTS FOR THE USE OF BELL-TYPE FURNACES FOR HEATING OF DECENTRALIZED CONSUMERS

The prospect of using the bell-type furnaces for heating of decentralized consumers is concerned. The comparative analysis of efficiency of modern wood stoves and boilers of long burning is conducted. The method to determine furnace efficiency by direct and reverse balance is presented. According to the results of the experimental tests, the efficiency of bell-type furnaces is 95%, which opens up the opportunities for their widespread application.

Key words: furnace heating; wood heating; efficiency of furnaces; furnace of Kuznetsov; system of free gas movement.

ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на развитие сетей газоснабжения и электро-снабжения и использования, соответственно, газа и электричества для отопления децентрализованных потребителей, доля дровяного отопления остается высокой. Дровяные печи используются для отопления зданий и приготовления пищи. Кроме этого, даже при наличии газа и электричества, повсеместно применяются дровяные печи для бань.

Однако эффективность применяемых дровяных печей является невысокой, особенно по сравнению с электрическим и газовым отоплением, для которых коэффициент полезного действия (КПД) отопительных приборов составляет 100 % и до 95 % соответственно. Так, КПД печи-буржуйки составляет менее 50 %. Кроме этого, печи типа буржуйки, которые принципиально состоят из металлической топki, имеют высокую температуру в момент горения топлива и быстро остывают при его прекращении. Поэтому для поддержания температуры в помещении такую печь необходимо часто растапливать, что представляет эксплуатационное неудобство.

Повышенную эффективность и удобство в эксплуатации имеют печи длительного горения. Топливо в эти печи закладывается 1-2 раза в сутки и медленно горит

в течение 6-10 часов. Однако КПД таких печей также относительно невысокий, в среднем до 85 %. Обзор эффективности современных дровяных печей [1-5] представлен в таблице 1.

Таблица 1

Обзор эффективности современных печей

Тип печи	КПД, %
«Ермак-Термо» (Stoker)	более 75
«Огонь-батарея»	до 87
«Профессор Бутаков»	85
Печи длительного горения типа «Булерьян»	до 80
Пиролизный котел фирмы «Гейзер»	80-90

МНОГОКОЛПАКОВЫЕ ПЕЧИ

Альтернативой существующим дровяным печам могут служить многоколпаковые печи. Устройство и принцип действия многоколпаковой печи основаны на теории «свободного движения газов», предложенной в начале XX века В.Е. Грум-Гржимайло. Согласно этой теории, струйки горячего газа, находящегося в колпаке, то есть в некотором объеме, ограниченном со всех сторон кроме нижней плоскости, за счет более низкой плотности поднимаются вверх, а струйки холодного газа, располагающиеся у стенок колпака, где происходит теплообмен газа с окружающей средой, за

счет более высокой плотности опускаются вниз, таким образом, происходит естественное разделение горячих и холодных газов. При достаточной поверхности теплообмена горячие газы не покинут колпак, пока полностью не охладятся (выходу горячих газов будет препятствовать холодный атмосферный воздух) [6]. Кроме этого, в колпаковой печи пары воды, содержащиеся в топливе, охлаждаясь, будут опускаться в нижнюю часть колпака и взаимодействовать с углеродом топлива. В результате происходит газификация, образуются монооксид углерода и водород, которые затем сжигаются. Реакция газификации происходит с поглощением теплоты, но эта теплота меньше теплоты, выделяющейся при сгорании водорода и монооксида углерода, то есть суммарный тепловой эффект реакций положительный [6]. В результате КПД печи, определяемый с использованием низшей рабочей теплоты сгорания, может превышать 100 %.

Схема, показывающая устройство печи и направление движения газов, изображена на рис. 1.

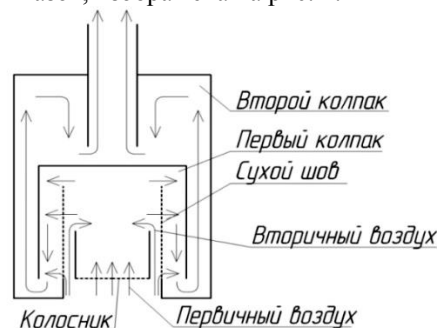


Рис. 1. Устройство печи и направление движения газов

«Сухим швом» на схеме печи называется вертикальная щель, сделанная в стенке между топкой и первым колпаком. Через сухой шов в первый колпак могут выйти условно холодные газы из топки. При избыточной тяге дымовой трубы, начало которой расположено в нижней части второго колпака, через сухой шов напрямую во второй колпак проходит атмосферный воздух, то есть горячие газы из топки печи не выходят, следовательно, значительно снижаются потери теплоты с уходящими газами.

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ

Для определения эффективности многоколпаковой печи были проведены экспериментальные исследования. КПД печи рассчитывался по прямому и по обратному балансу.

Тепловой баланс печи описывается уравнением [7]:

$$Q_n^p = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4, \quad (1)$$

где Q_n^p – рабочая низшая теплота сгорания топлива, Q_1 – теплота, переданная от печи отапливаемому помещению, Q_2 – тепловые потери с уходящими газами, Q_3 – тепловые потери из-за химической неполноты сгорания топлива, Q_4 – тепловые потери из-за механической неполноты сгорания топлива.

Рабочая низшая теплота сгорания топлива вычисляется по формуле:

$$Q_n^p = m \cdot q, \quad (2)$$

где m – масса топлива (дров), кг; q – удельная теплота сгорания дров, МДж/кг.

Удельная теплота сгорания дров рассчитывается с учетом влажности дров [7]:

$$q = 18,44 - 0,21 \cdot W \text{ МДж/кг}, \quad (3)$$

где W – влажность дров, %.

При проведении исследований для определения массы дров использовались электронные весы. Влажность дров измерялась влагомером Testo 606. При испытаниях вся масса дров помещалась в топку печи полностью (то есть печь топилась одной порцией, дрова не подкладывались).

Теплота, переданная от печи помещению, вычисляется отдельно для каждой стенки печи по формуле:

$$Q_{1i} = F \cdot \alpha \cdot (t_n - t_g) \cdot \tau, \quad (4)$$

где F – площадь стенки печи, α – коэффициент теплоотдачи, t_n – средняя за время теплоотдачи температура стенки печи, °С; t_g – средняя за время теплоотдачи температура воздуха в помещении, °С; τ – время теплоотдачи, с.

Для определения температур стенок печи и температуры воздуха в помещении использовалась многоканальная измерительная система, регистрирующая 48 значений температур с периодом в одну минуту. Каждая стенка печи была разделена на 12 равных прямоугольников, в центре каждого прямоугольника устанавливалась термопара, подключенная к измерительной системе. Время теплоотдачи определялось как промежуток времени, в течение которого средняя температура стенок печи (рассчитанная по данным системы) опускалась до начального значения (до зажигания дров). Полная теплота, переданная от печи помещению, равна сумме значений для каждой стенки.

Коэффициент теплоотдачи рассчитывается по формуле [7]:

$$\alpha = 2,24 \sqrt{(t_n - t_g)} + 4,5 \cdot \frac{\left(\frac{t_n + 273}{100}\right)^4 - \left(\frac{t_g + 273}{100}\right)^4}{t_n - t_g}. \quad (5)$$

КПД печи по прямому балансу равен

$$\eta_{np} = Q_1 / Q_n^p. \quad (6)$$

Тепловые потери с уходящими газами вычисляются по формуле:

$$Q_2 = \frac{v \cdot S}{22,4} \cdot \mu_{cp} \cdot (t_{de} - t_g) \cdot \tau_g, \quad (7)$$

где v – скорость воздуха в поддувальном проеме, S – площадь поддувального проема, t_{de} – средняя за время горения температура уходящих газов, τ_g – время горения, $\mu_{cp} = 29,3$ кДж/(кмоль·К) – молярная теплоемкость газов. Для определения скорости воздуха использовался анемометр Актаком АТТ-1004.

Химический недожог:

$$Q_3 = v \cdot S \cdot \tau_g \cdot n_{CO} \cdot 12,64 \text{ МДж} \quad (8)$$

где n_{CO} – средняя за время горения объемная концентрация монооксида углерода (CO); 12,64 МДж/м³ –

удельная теплота сгорания СО. Для определения концентрации СО в дымовых газах использовался газоанализатор Testo 330LL.

Механический недожог:

$$Q_4 = m_{\text{уг}} \cdot 8000 \text{ ккал} \quad (9)$$

где $m_{\text{уг}}$ – масса угля, оставшегося на колоснике и в поддувале печи.

КПД печи по обратному балансу равен:

$$\eta_{\text{обр}} = 1 - \frac{Q_2 + Q_3 + Q_4}{Q_{\text{н}}} \quad (10)$$

ВЫВОДЫ

По результатам серии испытаний КПД многоколпаковой печи по прямому и по обратному балансу совпадал и составлял 90-95 %. Содержание монооксида углерода (угарного газа) в дымовых газах составляло менее 0,3 %, что соответствует экологическим нормам, принятым в Европе (в частности, в Австрии). Период остывания печи составлял около суток, то есть при использовании для отопления такую печь нужно топить один раз в сутки.

Таким образом, экспериментально подтверждено, что эффективность многоколпаковой печи выше всех современных типов отопительных дровяных печей и практически равна эффективности газовых котлов. Это открывает широкие перспективы по использованию таких печей для отопления децентрализованных

потребителей. Помимо высокой эффективности, многоколпаковые печи имеют широкую функциональность. Существуют варианты конструкции, которые могут применяться, кроме отопления, для приготовления пищи (на плите и в камере-духовке), для копчения, в качестве банных печей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Паспорт Stoker 100-С. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.ermak-termo.ru/catalog/370/836/> (дата обращения 21.09.16)
2. Огонь-Батарея: отопительная печь с отличными отзывами. [Электронный ресурс]. URL: <http://teplowood.ru/pech-ogon-batareya.html> (дата обращения 21.09.16)
3. Печи отопительные профессор Бутаков. [Электронный ресурс]. URL: <http://professor-butakov.ru/pb/> (дата обращения 21.09.16)
4. Печь длительного горения «Клондайк НВ-150-Булерьян». [Электронный ресурс]. URL: <http://bullenjan.su/order/5> (дата обращения 21.09.16)
5. Котел отопительный на твердом топливе «Гейзер». <http://kosgeyser.ru/uploads/kotel-pasport-2015.pdf> (дата обращения 21.09.16)
6. Способ сжигания топлива / Кузнецов И.В. // Патент РФ № 2553748 от 05.03.2014
7. ГОСТ 3000-45 «Печи отопительные теплоемкие. Метод испытания».

УДК 621.22

Т. В. Терентьева, В. И. Велькин

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина,
г. Екатеринбург, Россия

ПЕРСПЕКТИВЫ СОЗДАНИЯ МАЛЫХ ГЭС НА СУЩЕСТВУЮЩИХ ГТС И ОБЗОР СОСТОЯНИЯ ФОНДА ГТС СВЕРДЛОВСКОЙ ОБЛАСТИ

Свердловская область обладает существенным потенциалом неэнергетических водохранилищ, на которых возможна установка малых ГЭС. Фонд ГТС области нуждается в реконструкции. Перспективным вариантом является реконструкция плотин с проектированием на них электрических станций.

Ключевые слова: гидротехнические сооружения; малая гидроэнергетика; реконструкция ГТС.

T. V. Terenteva, V. I. Velkin

Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

THE CREATION OF SMALL HYDROPOWER PLANTS ON EXISTING DAMS AND OVERVIEW OF DAMS FUND OF SVERDLOVSK REGION

Sverdlovsk region has a significant potential of non-energy reservoirs, where small hydropower plants can be installed. A dams fund of the region is in need of renovation. A promising option is the reconstruction of the dams with the design of power plants on them.

Key words: dam; small hydro; reconstruction of dams.

Нам нередко приходится слышать, что развитие ВИЭ в Свердловской области бесперспективно: интенсивность солнечного излучения невысокая и не-

равномерная, ветровой потенциал низкий, а крупных рек на территории региона нет. Но это утверждение не так уж однозначно. Ссылаясь на истори-

ческую перспективу, можно отметить, что во времена дореволюционной России в Свердловской области действовали порядка 300 ветряных мельниц и 150 энергетических гидросооружений.

Гидросооружения на Среднем Урале использовались как приводы для мощнейших заводов. Для своего времени это были достаточно крупные энергетические сооружения, но сейчас их классифицировали бы как малые ГЭС (МГЭС, суммарная установленная мощность гидроагрегатов до 30 МВт). В двадцатом веке энергетика имела уклон в централизацию и укрупнение энергоузлов. Безусловно, такой подход заметно повысил эффективность работы традиционных тепловых станций. В период застоя, а потом и перестройки почти все МГЭС были переведены в состояние недействующих. Но гидротехнические сооружения (ГТС) соответствующих объектов сохранились и почти все поддерживаются в рабочем состоянии. Это гидросооружения различных назначений: энергетические, выполняющие функции регулирования водотока, оросительные, ирригационные (на р. Тавда), осушительные, в том числе дренажные, обводнительные и прочие.

Один из ВИЭ – гидроэнергия – дешевый, доступный и относительно экологически чистый ресурс для производства электроэнергии. Малые ГЭС лишены части недостатков, присущих крупным ГЭС, и являются одним из решений проблемы энергодефицита в удаленных районах. Среди недостатков гидроэнергетики отмечаются сравнительно большие инвестиции в строительство, проекты ГЭС недоступны бедным странам и малому и среднему бизнесу [1].

Основная, самая существенная часть инвестиций проекта малой ГЭС идет на строительство плотины, дамбы, гидротехнического сооружения, создающего напор. В России имеется гидропотенциал и научно-техническая база для разработки и реализации проектов МГЭС, однако, развитие малой гидроэнергетики в стране по ряду причин тормозится.

ПОТЕНЦИАЛ ГИДРОЭНЕРГЕТИКИ В СВЕРДЛОВСКОЙ ОБЛАСТИ

Свердловская область обладает существенным потенциалом малой гидроэнергетики. На территории области протекает более 18 тысяч рек и речек. Имеется более 100 водоемов с объемом воды выше 1 млн. куб. м, большая часть из них имеет регулируемый водосброс. Гидрологический потенциал области характеризуется следующими особенностями:

- 1) наличие рек с большими дебетами и малыми перепадами высот по длине русла;
- 2) наличие рек с малыми дебетами и значительными перепадами высот;
- 3) наличие большого количества искусственных водоемов (прудов) с регулируемым водосбросом небольшой высоты (2–10 м);
- 4) значительная годовая неравномерность дебета рек (весеннее половодье и осенне-зимняя межень).

В целом по области существующий гидрологический потенциал оценивается экспертами на уровне 300 МВт [2].

Потребность в освоении этих ресурсов существует. В регионе имеется ряд населенных пунктов, удаленных от сетей централизованного электроснабжения. По данным администраций муниципальных образований на территории Свердловской области 31 населенный пункт, не охваченный централизованным электроснабжением. Подключение их к централизованной электросети нецелесообразно в силу дороговизны, расселение этих населенных пунктов невозможно в силу необходимости сохранения существующего жизненного уклада, а обеспечение параметров комфортного существования необходимо согласно обязательствам, принятым правительством Свердловской области. Между тем, практически все из них рядом с рекой. Часто в ближайшей доступности к населенным пунктам расположены такие гидросооружения, как плотины и дамбы.

ХАРАКТЕРИСТИКА ФОНДА ГТС В СВЕРДЛОВСКОЙ ОБЛАСТИ

В Свердловской области известно порядка 500 водохранилищ, на учете стоит 410. В целом водные ресурсы Свердловской области отличаются значительной неравномерностью распределения не только во времени, но и по территории [3]. Среднегодовой сток рек, формирующийся на территории области, составляет 29,1 км³, из сопредельных областей поступает в среднем ежегодно около 1,0 км³. Объем годового стока в маловодный год 95 % обеспеченности снижается в 2,02 раза. По этой и ряду других причин использование зарегулированного стока является гарантией обеспечения водопотребления населения, промышленности и сельского хозяйства. Для покрытия дефицита построен целый ряд водохранилищ и прудов, а также производится внутрибассейновые и межбассейновые переброски стока. Характерной особенностью системы регулирования стока в регионе является каскадность расположения водохранилищ.

Суммарная площадь водосбора верхних участков рек, зарегулированных в настоящее время водохранилищами, составляет 36 200 км² или 18 % площади области и принадлежит бассейнам семи основных рек, пересекающих границу области: Тавда, Тура, Пышма, Исеть, Чусовая, Уфа, Сытва. Призмы сработки подавляющего большинства водохранилищ незначительны – от 1 до 3 м. Большие призмы сработки имеют водохранилища: Ново-Мариинское на р. Ревда (15 м), Нижне-Качканарское (15 м), Верхне-Выйское (14 м), Нижне-Салдинское (7 м), Краснотурьинское (8 м), Верхне-Макаровское (8 м) и другие. Крупнейшими по общему объему является Белоярское (265 млн м³) и Рефтинское (142 млн м³) водохранилища. На рис. 1 изображена карта Свердловской области с указанием пяти крупнейших искусственных неэнергетических водохранилищ.

Большинство водоемов имеют площадь зеркал 4–8 км², наибольшая площадь у Белоярского – 38 км², не считая зарегулированных верховых озер. Суммарная полезная отдача водохранилищ в год 95 %

обеспеченности составляет 1616,8 млн м³. Крупнейшими по полезной отдаче являются Верхне-Макаровское (2,4 м³/с), Ново-Мариинское (2,65 м³/с) – Нижне-Тагильское (0,84 м³/с), Черноисточинское (около 1,6 м³/с), Михайловское (3,29 м³/с) водохранилища. Увеличение полезных отдач действующих водохранилищ за счет изменения подпорных отметок, как правило, невозможно, так как эти отметки лимитируются отметками гарантированной работы водозаборов или застроенностью прилегающих к водохранилищам территорий.



Рис. 1. Карта гидрологической сети Свердловской области

Отличительная особенность регулирования стока основных рек нашей области – каскадное расположение водохранилищ. Так, на р. Исети размещено 7 водохранилищ, на р. Нейве – 5, на р. Чусовой и Ревде с притоками – 15. Из 128 крупнейших водохранилищ многолетнее регулирование осуществляется на 20, наиболее высокий коэффициент регулирования имеет Нижне-Качканарское водохранилище на р. Вые.

Преобладающая часть гидротехнических сооружений относится ко II классу капитальности (Белоярское – I класс). Пропускная способность водосбросов большинства водохранилищ соответствует классу капитальности. Наибольшую пропускную способность (более 500 м³/с) имеют следующие водохранилища: Волковское – 940 м³/с; Михайловское – 730 м³/с; Алапаевское – 600 м³/с; Нижне-Салдинское – 570 м³/с; Нижне-Тагильское – 528 м³/с; Режевское – 515 м³/с. Напоры на большинстве старых плотин от 5 до 10 м. Большие напоры на новых: Ново-Мариинском – 27 м, Белоярском – 20 м, Рефтинском – 22 м.

В Свердловской области в 55 муниципальных округах эксплуатируется около 500 напорных гидротехнических сооружений, из них на учете МЧС по

Свердловской области состоит 410 водохранилищ. Из них объемом более 1 млн. м³ – 115 с суммарным объемом 2,4 млрд. м³, в том числе 28 водохранилищ объемом более 10 млн м³, 7 водохранилищ имеют объем более 100 млн м³.

В рамках проверки МЧС был разработан перечень гидротехнических сооружений водохранилищ, прудов, поднадзорных федеральной службе по экологическому, технологическому и атомному надзору, расположенных на территории Свердловской области по состоянию на 01.01.2009 года [4]. В табл. 1 отражена статистика по указанному перечню.

Таблица 1

Статистика по перечню ГТС от 01.01.2009.

Классифицирующий признак	Характеристика	Количество ГТС вдхр.
Объем водохранилища с ГТС	более 1 млн. м ³	115
	более 10 млн. м ³	28
Работоспособность и исправность ГТС	работоспособное, с пометкой неисправное	124
	работоспособное	148
	среди них ограниченно работоспособных	10
	неработоспособное	26
	неисправное	72
	спущенных прудов / водоемов	18
	состояние предельное	21

Также нужно отметить, что на территории области на момент проверки числилось 100 ГТС водохранилищ с пониженным уровнем безопасности. На территории области расположено одно ГТС (Городской нижний – р. Талый Ключ, г. Талица), отметка пруда которого ниже нормального подпорного уровня.

В таблице 2 отдельно рассмотрена категория «работоспособное, но неисправное» как вторая по численности и наиболее характерная для малых населенных пунктов. На рис. 2 наглядно отображены показатели таблиц 1 и 2.

Более актуальные данные (2016 г.) были получены в ходе проверки прокуратурой Свердловской области [5]. Актуальность этой проверки обусловлена тем, что на территории области учтено 513 гидротехнических сооружений, лишь на 139 из которых уровень безопасности квалифицирован как нормальный. На остальных ГТС уровень безопасности варьируется от пониженного до опасного. Наиболее часто встречающиеся нарушения, выявленные в ходе

проверки: отсутствие у собственника (эксплуатирующей ГТС организации) декларации безопасности и разрешений на эксплуатацию ГТС.

Таблица 2

Статистика по перечню ГТС от 01.01.2009, категория «работоспособное, но неисправное»

Классифицирующий признак	Характеристика	Количество ГТС водохранилищ
Объем водохранилища ГТС	более 1 млн. м ³	19
	более 10 млн. м ³	2
Работоспособность и исправность ГТС	ограниченно работоспособных	9
	отм. пруда < НПУ	1
	пруд частично спущен	1
Право собственности	адм. МО / другое муниципальное подразделение	104
	федеральная госсобственность	2
	частное предприятие	6
	неизвестно	1
	бесхозяйственное, в т. ч. в процессе оформления	10
Ответственность за эксплуатацию ГТС	адм. МО / другое муниципальное подразделение	94
	специализ. предпр. по эксплуат. ГТС	7
	частное предприятие	19
	неизвестно / не эксплуатируется	3

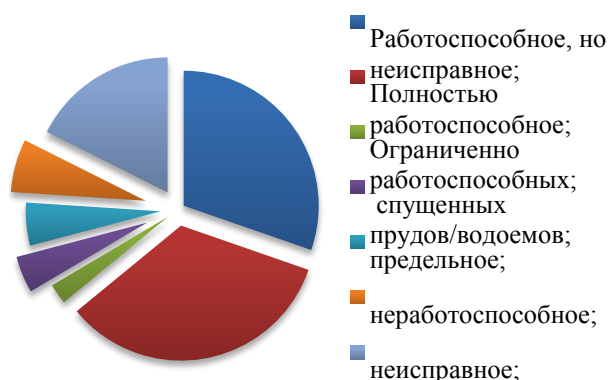


Рис. 2. Диаграмма состояния ГТС в регионе

Собственниками и эксплуатирующими организациями гидротехнических сооружений допускаются нарушения требований законодательства о создании финансовых и материальных резервов, предназначенных для ликвидации аварий. В ряде случаев выявлены нарушения, связанные с тем, что собственник гидротехнического сооружения и эксплуатирующая организация не должным образом организо-

вывают эксплуатацию гидротехнического сооружения и обеспечивают соответствующую нормам и правилам квалификацию работников эксплуатирующей организации. У некоторых ГТС вообще отсутствует собственник. Всего же на территории Свердловской области юридически неоформленными (бесхозными) остаются 11 ГТС (в Полевском, Шалинском, Верх-Нейвинском, Красноуфимском, Режевском, Белоярском, и Горноуральском городских округах).

Как видно, в области крайне актуальной проблемой является изношенность фонда водохранилищ, отсутствие у ряда водохранилищ ответственных за эксплуатацию, несоблюдение ряда норм безопасности. Часть фонда водохранилищ нуждается в реконструкции. В мировой практике в проекты реконструкции водохранилищ включают установку МГЭС. Перспективность такого решения обусловлена отсутствием капитальных затрат на возведение плотины, возможность обеспечить электроэнергией энергодефицитные районы.

Авторами статьи помимо анализа состояния фонда ГТС Свердловской области также на практическом примере была рассмотрена техническая возможность и экономическая эффективность проекта ГТС на наиболее типичном водохранилище Свердловской области Черданское водхр., р. Сысерть. Гидротехническое сооружение пруда нуждается в реконструкции. Параметры ГТС водохранилища и реки Сысерть позволяют установить на Черданском водохранилище малую ГЭС. Экономические расчеты говорят об окупаемости проекта в течение 5-6 лет.

По итогам выполненного исследования можно говорить о перспективности развития направления малой гидроэнергетики в Свердловской области, в частности, перепроектирования существующих ГТС под малые ГЭС.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Васильев Ю. С. Гидроэнергетические установки: краткий конспект лекций / Ю.С. Васильев, В.В. Елистратов. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. – 128 с.
2. Об утверждении схемы и программы развития электроэнергетики Свердловской области на 2014-2018 годы и на перспективу до 2023 года. Правительство Свердловской области. Постановление от 30 апреля 2013 года N 540-ПП.
3. Поторочина С. А. Водохранилища Свердловской области и их хозяйственное использование / С.А. Поторочина. Вода России, вып. от 28 мая 2008.
4. Урусов В.А. Перечень гидротехнических сооружений водохранилищ, прудов, поднадзорных федеральной службе по экологическому, технологическому и атомному надзору, расположенных на территории Свердловской области, по состоянию на 01.01. 2009 года (410 ГТС) / В.А. Урусов ФГУ «ТФИ по УрФО», 2009.
5. Прокурорская проверка в сфере обеспечения безопасности ГТС / Новостной портал прокуратуры Свердловской области, 24.12.2009.

УДК 621.548.6

А. Д. Шутов, А. И. Попов

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина,
г. Екатеринбург, Россия

ПРЕИМУЩЕСТВА ВЕТРОДВИГАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ЭФФЕКТА МАГНУСА

В статье рассматриваются основные преимущества и примеры конструкций ветродвигателей на основе эффекта Магнуса.

Ключевые слова: эффект Магнуса; сила Магнуса; ветродвигатель; ветроэлектрическая установка.

A. D. Shutov, A. I. Popov

Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

THE ADVANTAGES OF WIND TURBINES BASED ON MAGNUS EFFECT

The article discusses the advantages and examples of structures of wind turbines based on Magnus effect.

Key words: Magnus effect; Magnus power; wind turbine; wind power plant.

На сегодняшний день ветроустановки с горизонтальной осью вращения практически изжили себя. Это обусловлено тем, что для получения больших мощностей необходимо увеличивать ометаемую площадь, а значит, увеличивать размер лопастей. Это, в свою очередь, ведёт к необходимости увеличивать и размеры башни, таким образом, стоимость ветроустановки возрастает в кубической зависимости. Кроме того, существующие в настоящее время и широко используемые в мире лопастные ветрогенераторы неустойчиво и неэффективно работают при малых скоростях ветра, которые характерны для основной площади континентальной части Земли. Поэтому следует обратить внимание на ветроустановки, использующие эффект Магнуса, основные преимущества которых проявляются при низких, но наиболее часто повторяющихся скоростях ветра 2-6 м/с.

При поперечном обтекании вращающегося цилиндра на него действует подъемная сила, а также силы сопротивления поступательному движению и вращению. Наиболее значительной из них является сила Магнуса, которая направлена по нормали к набегающему потоку и к оси цилиндра. При оптимальных условиях обтекания цилиндра она на порядок и более превосходит подъемную силу лопасти, что позволяет использовать ее для вращения ветроколеса. Силы сопротивления тоже играют существенную роль, определяя его быстроходность и затраты мощности на вращение цилиндра.

В Республике Беларусь (фирма «Аэролла» совместно с коллективом сотрудников РАН Беларуси) создана опытная ветроустановка роторного типа с использованием эффекта Магнуса мощностью 100 кВт, которая была смонтирована вблизи окружной дороги г. Минска.

Проведенные ранее ООО «Аэролла» НИР по данному направлению показали, что КПД (коэффициент использования) такой турбины удастся повысить в 2–3 раза относительно лопастных.

К сожалению, место расположения ВЭУ на площадке, где она была изготовлена, было выбрано неудачно из-за относительно низкого диапазона скорости ветра. Тем не менее, испытания этой установки показали удовлетворительные результаты (рис. 1).

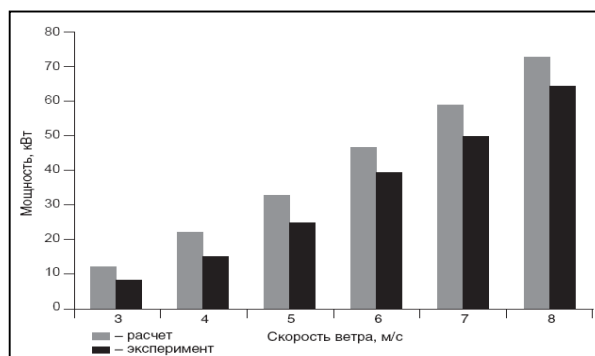


Рис. 1. Результаты испытания установки «Аэролла»

С одной стороны, роторные установки такого типа обладают высокой эффективностью (в случае применения устройств, повышающих подъемную силу Магнуса), менее требовательны к направлению ветра, чем наиболее распространенные крыльчатые ветроустановки. В то же время, использование роторных ветроустановок повышает расход материалов, значительно более сложная конструкция может свести на нет все выгоды от высокой эффективности (осуществление форм без подвижных частей много проще), роторная конструкция склонна к автоколебательным процессам, снижающим срок службы роторов. Поэтому нужно отметить, что, применяя вращающиеся цилиндры, нельзя существенно сэкономить на площади аэроплан-ных крыльев, ветряных мельниц и пр., так как пределы

мощности этих частей в значительной мере зависят от количества воздуха, захватываемого в единицу времени. Это количество определяется, однако, площадью крыльев. С другой стороны, хорошие формы подъемных крыльев испытывают в направлении движения меньшее сопротивление. Таким образом, будущее ветроустановок, использующих эффект Магнуса, будет зависеть от соотношения: выигрыш в эффективности – сложность конструкции.

Наличие недостатков, присущих ветроустановкам с горизонтальной осью вращения ветроколеса, использующих эффект Магнуса, в основном, объясняется следующими обстоятельствами.

Сила Магнуса Y в общем виде выражается формулой:

$$Y = \rho \cdot V \tilde{A} L, \quad (1)$$

где ρ – плотность среды, V – скорость набегающего потока, \tilde{A} – циркуляция, создаваемая вращением цилиндра, L – длина цилиндра.

Циркуляция для реального, отрывного обтекания описывается следующим образом:

$$\tilde{A} = K_A (2\pi R^2 \cdot \omega), \quad (2)$$

где K_A – коэффициент, учитывающий влияние отрыва потока (при безотрывном обтекании $K_A \leq 1$), R – радиус цилиндра, ω – частота вращения.

Таким образом, улучшение характеристик подобных ВЭУ возможно при безотрывном обтекании цилиндров при учете их длины, диаметра, частоты вращения.

Однако увеличение геометрических размеров цилиндров, а также частоты их вращения значительно усложняет конструкцию и имеет определенные пределы для ветроустановок с горизонтальной осью вращения, использующих эффект Магнуса. Это объясняется также тем, что радиально расположенные цилиндры имеют только нижнюю опору в ступице ветроколеса около оси, что вызывает вибрации, удары и боковые усилия на изгиб, причем чем длиннее цилиндр, тем больше проявляются эти негативные факторы.

Однако наибольший эффект силы Магнуса проявляется при относительном удлинении цилиндра более двенадцати, т.е.

$$l/d > 12 \quad (3)$$

где l – длина цилиндра, d – диаметр цилиндра.

Кафедра «Атомные станции и возобновляемые источники энергии» Уральского Федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина имеет патент РФ 2526127 «Ветродвижитель с эффектом Магнуса».

Задачей предлагаемого изобретения является устранение основных недостатков и повышение эффективности работы ветродвигателей данного типа.

Технические преимущества рассматриваемого изобретения следующие:

– цилиндры ветродвигателя размещены горизонтально и закреплены с двух сторон в дисках, вращающихся на

неподвижной оси, закрепленной в опорах. Такая жесткая конструкция снимает ограничения по длине цилиндров, а также по количеству цилиндров, габаритам и весу устройства в целом;

– привод выполнен от одного двигателя посредством гибкой связи на шкивы цилиндров, находящиеся на наветренной стороне;

– использован экран, который закреплен на неподвижной оси, и поэтому он затеняет от потока цилиндры, находящиеся на подветренной стороне установки, что повышает ее эффективность;

– нет необходимости размещать на цилиндрах отдельно дополнительные концевые шайбы, однако для дальнейшего уменьшения индуктивного сопротивления цилиндры могут быть выполнены плавно расширяющимися по длине – от их минимального диаметра в средней части до максимального диаметра в обоих торцах.

Такое техническое решение может найти применение в ветроэнергетике, преимущественно при создании мощных ВЭУ, расположенных на возвышенностях в зоне стабильных ветров.

Схема «Ветродвижителя с эффектом Магнуса» приведена на рис. 2, в варианте, когда привод выполнен для каждого цилиндра от отдельного электродвигателя, а на рис. 3 привод для всех цилиндров осуществлен от одного электродвигателя гибкой связью.

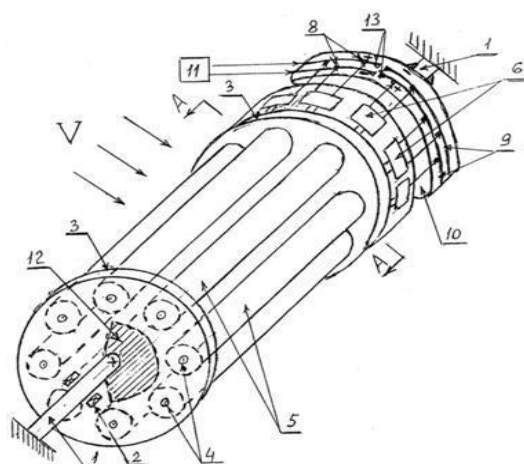


Рис. 2. Ветродвижитель с эффектом Магнуса

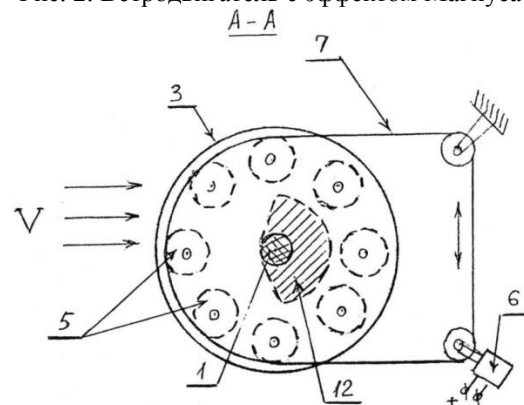


Рис. 3. Ветродвижитель с эффектом Магнуса (вариант с одним электродвигателем)

Ветроколесо (рис. 2) ветродвигателя выполнено в виде горизонтально расположенного барабана. На неподвижной оси 1, закрепленной неподвижно в опорах, в подшипниках 2 вращаются диски 3, в которых на своих осях 4 размещены вращающиеся цилиндры 5, а их оси соединены с одним или несколькими электродвигателями 6 привода цилиндров.

Как вариант, в устройстве может использоваться один электродвигатель 6 (рис. 3), передающий вращение посредством гибкой связи 7 (цепь, клиноремень и т. п.) на шкивы цилиндров 5.

В другом варианте, при использовании на каждом цилиндре своего электродвигателя электропитание на них подается (рис. 2) скользящим токосъемом 8 с кольцевых дорожек 9, расположенных на дополнительном диске 10, закрепленном на неподвижной оси, от источника питания 11. Внутри барабана между верхним и нижним положениями цилиндров размещен перпенди-

кулярно к направлению потока экран 12, а для варианта применения устройства, когда экран не используется, кольцевые дорожки для токосъема имеют в вертикальной плоскости сверху и снизу разрывы 13 в цепи, образуя две пары полуколец на наветренной и подветренной сторонах потока, подключенные разнополярно к источнику питания. Передача вращения на генератор, а также ориентация ветродвигателя на поток ветра осуществляются любым из известных способов (не показано).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Щеклеин С.Е. Попов А.И, патент РФ 2526127
2. Бычков Н.М. Ветродвигатель с эффектом Магнуса. Характеристики вращающегося цилиндра // Теплофизика и аэромеханика, 2005, том 12, № 1.
3. Бычков Н.М., Коваленко В.М. Аэродинамические характеристики кругового цилиндра в поперечном потоке // Изв. СО АИ СССР. Сер. техн. наук. – 1980. – №8, вып. 2. – С. 114-124.

УДК 62-1/-9

Е. А. Мерзлякова, М. А. Усова, А. И. Попов

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина,
г. Екатеринбург, Россия

РЕАКТОР АНАЭРОБНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ БИОМАССЫ

В данной статье рассмотрен реактор анаэробной переработки биомассы. Предлагаемое изобретение относится к биоэнергетике и может быть использовано в качестве универсального метантенка для переработки в метан и в органическое удобрение сельскохозяйственных отходов. Выполнено сравнение изобретения с прототипами. Описаны преимущества изобретения перед аналогами. Представлен чертеж конструкции в разрезе. В заключении сделан вывод о том, что предложенный реактор, перерабатывающий биомассы с различными свойствами, найдет широкое применение в биоэнергетике.

Ключевые слова: биоэнергетика; биомасса; реактор; анаэробная переработка; метантенк.

Е. А. Merzlyakova, M. A. Usova, A. I. Popov

Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

THE ANAEROBIC REACTOR FOR DIGESTION OF BIOMASS

The article describes the reactor for the anaerobic digestion of biomass. The proposed invention relates to bio-energy and can be used as a universal digester for conversion agricultural organic wastes into methane and fertilizer. The article makes the comparison of the invention with prototypes. Much attention is given to the advantages of the invention over similar products. Design sectional drawing is proposed. Conclusions are drawn that the proposed reactor which processes different types of biomass will be widely used for bio-energy.

Key words: bio-energy; biomass; reactor; anaerobic digestion; digester.

Современные проблемы энергетики могут быть решены только при рациональном использовании всех существующих на Земле и в околоземном пространстве источников топлива и энергии. Среди них биомасса, как постоянно возобновляемый источник топлива, занимает существенное место. Важным аспектом является получение различных видов биотоплива из отходов органического происхождения: опилок, соломы, шелухи, коры, лузги, навоза и так далее. Кроме того, большое внимание уделяется

производству жидких видов биотоплива (биоэтанол, биодизель и другие), которые призваны заменить традиционные виды топлива в двигателях внутреннего сгорания. Существенным преимуществом является возможность производства как электрической, так и тепловой энергии.

Современная российская биоэнергетика располагает целой серией высокотехнологичных биогазовых установок. В «Уральском федеральном универ-

ситете имени первого президента Российской Федерации Б.Н. Ельцина» кафедрой Атомных станций и возобновляемых источников энергии проводятся ряды исследований на биоэнергетических установках, а также разрабатываются патенты на изобретения.

В статье рассматривается реактор анаэробной переработки биомассы. Изобретение может быть использовано качестве универсального метантенка для переработки навоза животных, птиц, бытовых и сельскохозяйственных отходов в метан и в органическое удобрение.

Известны устройства аналогичного назначения, например, «Способ приготовления органических удобрений» по авторскому свидетельству 433114, «Метантенк» по авторскому свидетельству 1353753, «Метановый биокультиватор» по патенту 2093567, «Комплекс по переработке и обезвреживанию отходов» по патенту 2162380 и др. [1–4].

Данные устройства содержат корпус метантенка, разделенный на секции, нагреватели биомассы, системы подачи сырья и удаления готового продукта,

систему перемешивания осадка в метантенках и систему отвода газа.

Перечисленные выше устройства имеют разное конструктивное оформление, но не являются универсальными и предназначены, как правило, для переработки какого-либо одного вида отходов.

Например, птичий помет и спиртовая барда не перерабатываются в биогаз в обычном реакторе-ферментаторе, и в него требуется дополнительно устанавливать реактор гидролиза, чтобы управлять уровнем кислотности, иначе бактерии могут погибнуть из-за повышенного содержания кислот или щелочей. Управление балансом «кислота-щелочь» также позволяет увеличить выход метана.

Подобные нововведения в перечисленных аналогах отсутствуют.

Наиболее близким техническим решением (прототипом) является «Способ анаэробной переработки органических отходов и установка для его осуществления» по патенту РФ 2315721 [5].

На рис. 1 в разрезе изображена конструкция «Реактора анаэробной переработки биомассы».

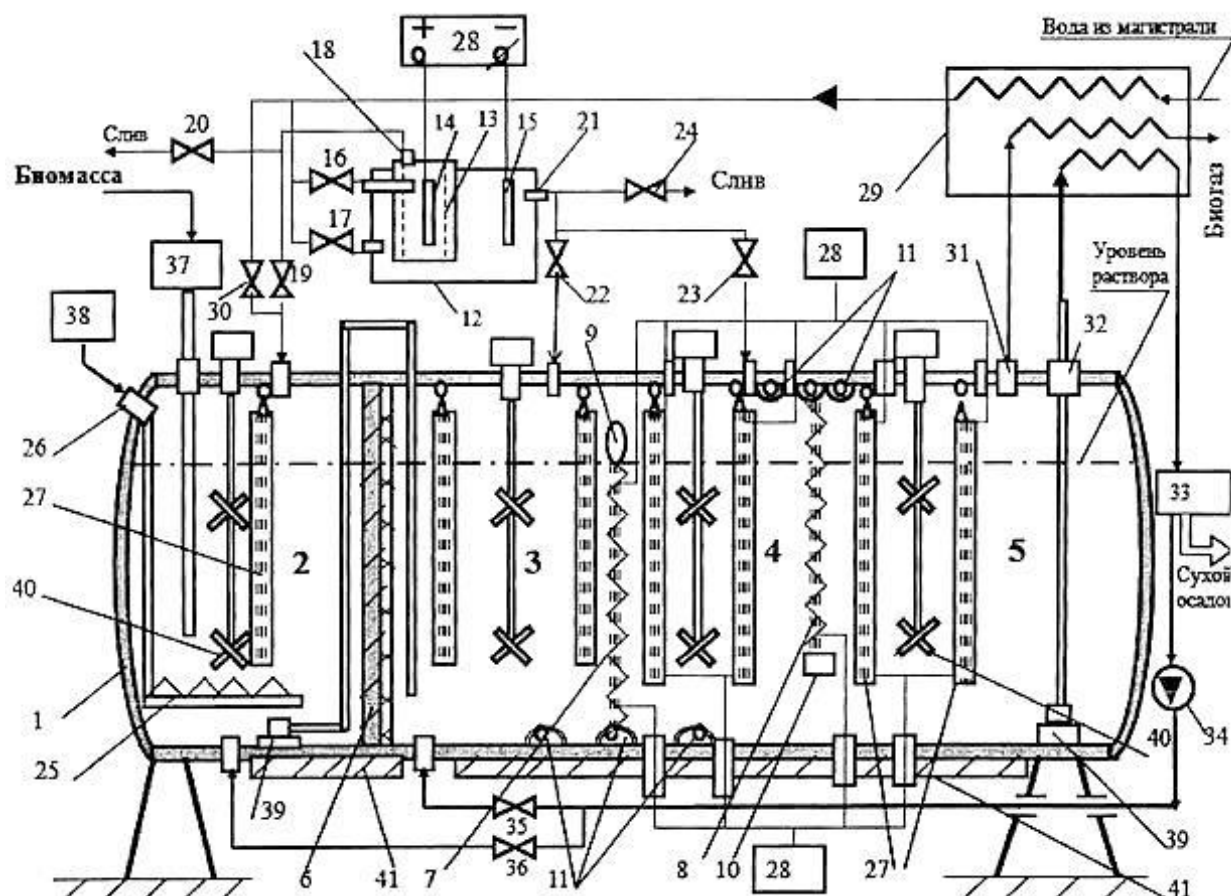


Рис. 1. Реактор анаэробной переработки биомассы

1 – корпус, 2 – секция подготовительного брожения, 3 – секция нейтрального брожения, 4 – секция щелочного брожения, 5 – секция метанового брожения, 6, 7, 8 – вертикальные перегородки, 9 – поплавок, 10 – груз, 11 – узлы крепления перегородок, 12 – диафрагменный электролизер, 13 – емкость с пористой диафрагмой, 14, 15 – электроды, 16, 17, 19, 20, 22, 23, 24, 30, 35, 36 – вентили, 18 – выход электролизера, 21 – выход гидроузла, 25 – азратор, 26 – вход азратора, 27 – вертикальные мелкоячеистые сетки, 28 – низковольтный источник питания, 29 – теплообменник, 31, 32 – выход реактора, 33 – сепаратор, 34, 39 – насосы, 37 – пресс-экструдер, 38 – компрессор, 40 – мешалка, 41 – система основного нагрева биомассы

Данная установка содержит анаэробный биореактор с нагревателем биомассы, систему подачи исходного сырья, систему удаления биогаза, систему удаления жидкого органического удобрения, систему управления процессом, причем биореактор разделен перегородками на четыре секции брожения, введена система подготовки исходного сырья с устройством измельчения, подогрева и смешивания с перебродившим шламом, а также устройство интенсивного перемешивания биомассы внутри анаэробного реактора.

Недостатком этой установки является ее сложность, что снижает надежность работы установки и увеличивает себестоимость. В данном устройстве не предусмотрено взаимное изменение объемов секций брожения в зависимости от видов сырья, что снижает его эффективность, в том числе и в связи с переходом с одного режима сбраживания на другой.

Изобретение позволяет увеличить эффективность обычного реактора анаэробной переработки биомассы. Данное изобретение, по сравнению с прототипами, устраняет существенные недостатки и имеет ряд преимуществ.

Технический результат предлагаемого решения заключается в следующем:

- увеличение эффективности реактора за счет использования диафрагменного электрохимического электролизера и управления баланса «кислота-щелочь» путем ускорения создания в соответствующих секциях оптимального для них кислого, нейтрального, щелочного или метанового брожения. Кроме того, увеличение эффективности реактора достигается за счет создания оптимального соотношения объемов секций реактора путем переустановки перегородок внутри метантенка под конкретные виды сырья и условия сбраживания;
- увеличение эффективности за счет выполнения перегородок из эластичных токопроводящих материалов, подключенных к низковольтному источнику тока, что позволяет создать на их поверхности оптимальную температуру для адгезии и размножения метановых бактерий, а также прогревать слой сбраживаемой биомассы по высоте реактора, не увеличивая интенсивность работы мешалок;
- увеличение эффективности реактора за счет размещения внутри секций подвешенных мелкоячеистых сеток из волокнистого материала, иммобилизирующих на своих поверхностях соответствующий данной секции класс бактерий;
- увеличение эффективности реактора за счет ввода в подготовительную (кислую) секцию воздушного

аэратора жидкости и ввода части отсепарированной от твердого осадка жидкости из секции метанового брожения;

- увеличение эффективности реактора за счет использования дополнительного теплообменника, две теплообменные поверхности которого подключены к выходу твердого осадка и к выходу биогаза, обладающих накопленной теплотой, а третья теплообменная поверхность – ко входу добавочной воды из магистрали, что позволяет экономить энергию на нагрев ее до требуемой температуры.

Изобретение является передовым, его эффективность значительно выше, чем у аналогов. Предложенный реактор найдет широкое применение в качестве универсального метантенка для анаэробной переработки биомасс с различными свойствами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Авторское свидетельство СССР 433114, МПК C05F 3/00. Способ приготовления органических удобрений. В.П. Лосяков. – 1835755; заявл. 12.10.72, опубл. 25.06.74. (аналог).
2. Авторское свидетельство СССР 1353753, МПК C02F 11/04. Метантенк. А.А. Ковалев и В.П. Лосяков – 4036561; заявл. 12.03.86, опубл. 23.11.87 (аналог).
3. Патент 2093567 Российская Федерация. МПК C12M 1/107. Метановый биокультиватор. В.И. Тумченко. – 95101288; заявл. 30.01.95, опубл. 20.10.97 (аналог).
4. Патент 2162380 Российская Федерация, МПК B09B 3/00, A61L 11/00, C05F 9/00, C05F 9/04. Комплекс по переработке и обезвреживанию отходов. Р.Ф. Чиж, А.Н. Чумаков, В.В. Дегтярев – 99115398; заявл. 21.07.99, опубл. 27.01.2001 (аналог).
5. Патент 2315721 Российская Федерация, МПК C02F 3/28, C02F 11/04. Способ анаэробной переработки органических отходов и установка для его осуществления. В.В. Мохов, Е.В. Фомичева. – 2006110378; заявл. 03.04.2006, опубл. 27.01.2008 (прототип).
6. У.Э. Виестур, А.М. Кузнецов, В.В. Савенков. Системы ферментации. – Рига: Зинатне, 1986, 174 с.
7. Янко В.Г., Янко Ю.Г. Обработка сточных вод и осадка в метантенках, К., 1978, 120 с.
8. Авторское свидетельство 1139713 СССР, МПК C02F 3/20. Н.Ф. Мещеряков. Устройство для аэрации жидкости.
9. Авторское свидетельство 1341167 СССР, МПК C02F 3/20. А.Р. Гросс. Устройство для аэрации жидкости.

УДК 62-1/-9

Н. В. Обухова, А. И. Попов

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина,
г. Екатеринбург, Россия

СИСТЕМА УСКОРЕННОЙ АЭРОБНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ БИОМАССЫ

В данной статье рассмотрена система ускоренной аэробной переработки биомассы. Приведено описание конструкции и принципа работы установки. Система относится к области биотехнологий в сельском и лесном хозяйствах. В заключении приведен технический результат данной установки.

Ключевые слова: биомасса; аэробное сбраживание; удобрение; система.

N. V. Obukhova, A. I. Popov

Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

SYSTEM OF THE ACCELERATED AEROBIC PROCESSING OF BIOMASS

The system of accelerated aerobic biomass processing was considered in this paper. The description of structure and the principle of facility operation was shown here. The system relates to the sphere of agriculture and forestry biotechnology. The technical result of this system was given in conclusion.

Key words: biomass; aerobic digestion; fertilizer; system.

ВВЕДЕНИЕ

До настоящего времени в России использование возобновляемых источников энергии сдерживалось избытком добываемых в стране углеводородных топливно-энергетических ресурсов. Однако некоторые негативные тенденции, которые наблюдаются в системе традиционной энергетики с недавних пор, а также затрудненная экологическая обстановка, создали ряд предпосылок для развития сегментов альтернативной энергетики, одним из которых являются биогазовые технологии.

Ежесуточно в РФ производится более чем 450 тыс тонн навоза, помета и стоков очистных сооружений. Уже сегодня под навозные хранилища заняты более 2 млн га земли, и этот ресурс представляет реальную экологическую угрозу. Но это слишком большие объемы ресурса для того, чтобы использовать его в биогазовых установках с метановым циклом, так как это потребует больших затрат времени на процесс метано-

вого брожения, а также экономических затрат на строительство метантенков. Аэробные процессы позволяют значительно сократить сроки переработки исходного сырья, превращая его в экологически чистое, высокоэффективное органическое удобрение, которое является по качеству действия выше, чем химическое удобрение. Применение сброженной массы позволяет повысить урожайность полевых культур на 40-100 %. Данные установки будут полезны как очистные сооружения на фермах, птицефабриках, мясокомбинатах и т. д.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ

Сотрудниками кафедры «Атомные станции и возобновляемые источники энергии» Уральского Федерального Университета разработана «Система ускоренной аэробной переработки биомассы», схема которой изображена на рис. 1. Данная система работает следующим образом:

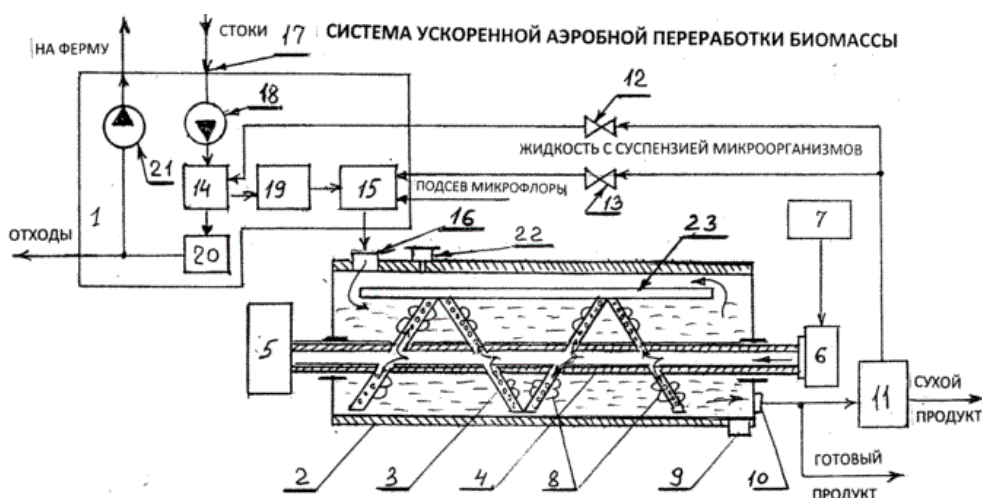


Рис. 1. Система ускоренной аэробной переработки биомассы

Биомасса, например, стоки с фермы, поступает в устройство 1 предварительной подготовки перерабатываемой жидкой среды через его вход 17 на насос-экструдер 18 для предварительного измельчения. С насоса-экструдера измельченная биомасса поступает в электрогидравлическую дробилку 19, а твердые частицы и лишняя жидкость подаются в шламовый отстойник 20, откуда очищенная жидкость насосом 21 подается обратно на ферму для использования в агрегатах смыва навоза.

В электрогидравлической дробилке [1] происходит гомогенизация и измельчение биомассы до мельчайших размеров, соизмеримых с размерами микроорганизмов, что делает этот кашеобразный продукт более усвояемым, т. к. увеличивается количество контактов бактерий с микрокусочками биомассы в процессе дальнейшей ферментации.

В дробилке 19 происходит одновременно обеззараживание и подогрев поступающей биомассы, которая затем передается в смесительную камеру 15. При первоначальном запуске системы на вход смесительной камеры 15 может подаваться подсев (инокуляция) аэробной микрофлоры, а при постоянной эксплуатации системы суспензии микроорганизмов на вход камеры 15 поступают через вентиль 13 с отсепарированной жидкостью от сепаратора 11, подключенного к патрубку 10 для выхода готового продукта.

Обогащенная бактериями биомасса с выхода смесительной камеры 15 поступает через патрубок 16 ввода сырья в корпус 2. Реверсивный электропривод 5 по заданной программе вращает трубу 4 с пустотелым шнеком из пористого металла, имеющего огромное количество микроотверстий. В настоящее время пористый металл выпускается из нержавеющей стали, никелевых сплавов, литого алюминия и меди [2–4].

С воздушного (газового) нагнетателя 7 воздух, технический кислород или озон подаются через муфту 6 скольжения в трубу 4 и далее через микропоры шнека 3 и волокнистый наполнитель 8 поступает в раствор. На волокнистом наполнителе 8 оседают колонии анаэробных бактерий [5, 6], жизнедеятельность которых интенсифицируется кислородом, что ускоряет их размножение. Исследования, проведенные в УрФУ показали, что обработка исходного сырья кислородом и озоном ускоряет его разложение на 9,3 % и 19,8 % соответственно.

Рейка-скребок 23 перемещаясь вблизи нижней поверхности корпуса не позволяет слеживаться осадку, а реверс электропривода 5 перемещает массу вдоль корпуса в прямом и обратном направлении, создавая условия для активного перемешивания жидкой среды и кислорода с бактериями для ускоренной аэробной переработки биомассы.

Аэробный процесс экзотермический, поэтому в процессе переработки биомассы необходимую температуру в корпусе можно также поддерживать, перемещая часть неиспользуемой жидкости с сепаратора 11 через вентиль 12 в сборник 14 исходного сырья.

Для условий жаркого климата термостатирование биомассы в корпусе может осуществляться подачей холодной воды в устройство «теплого пола», используемое при первоначальном запуске системы (не показано на чертеже).

Готовый продукт – жидкая переработанная биомасса выдается через патрубок 10, а при необходимости в виде сухого продукта с выхода сепаратора 11.

Максимальное ускорение аэробной переработки биомассы достигается в режиме однократной загрузки корпуса при закрытом патрубке 16 и реверсивном перемещении шнека 3 внутри корпуса до готовности продукта.

В режиме непрерывного проведения процесса через патрубок 16 поступает в малых расчетных дозах раствор биомассы и за определенное время по готовности продукта он поступает на патрубок 10 для выхода из корпуса.

Предлагаемая «Система ускоренной аэробной переработки биомассы» за счет использования насоса-экструдера в совокупности с электрогидравлической дробилкой и другими узлами устройства 1 предварительной подготовки перерабатываемой жидкой среды позволяет использовать различные виды исходного сырья: помет, траву, силос, листья, стоки канализации и т. д.

ТЕХНИЧЕСКИЙ РЕЗУЛЬТАТ РЕШЕНИЯ

1. Увеличена эффективность системы за счет размещения в корпусе пустотелого шнека из пористого металла на центральной трубе, подключенной одним концом к электроприводу, а другим – через муфту скольжения к газовому нагнетателю.
2. Увеличена эффективность системы и ее способность работать на разных видах биосырья за счет использования устройства предварительной подготовки перерабатываемой жидкой среды, содержащего последовательно включенные насос-экструдер, сборник исходного сырья, электрогидравлическую дробилку и смесительную камеру, выход которой соединен с патрубком ввода сырья в корпус ферментатора, причем в смесительную камеру с выхода корпуса подается также отсепарированная жидкость с суспензиями микроорганизмов.
3. Повышена эффективность системы за счет исключения застойных зон с накоплением вредной для аэробного процесса микрофлоры путем выполнения корпуса в виде цилиндра, размещением рейки-скребка на торцах шнека, причем ось вращения шнековой мешалки смещена вниз относительно оси цилиндрического корпуса.
4. Повышена эффективность системы за счет выполнения шнека из пористого металла с мельчайшими отверстиями и применения для аэрации технического кислорода и/или озона.
5. Повышена эффективность системы за счет размещения на поверхности шнека мелкоячеистой сетки

из волокнистого материала с развитой поверхностью, например, графитового войлока, для размещения анаэробной микрофлоры.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная «Система ускоренной аэробной переработки биомассы» найдет широкое применение в качестве универсального аэробного реактора для переработки органических отходов с различными свойствами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Юткин Л.А., Гольцова Л.И. Способ подготовки торфа для микробиологической бродильной и комбикормовой промышленности. Авторское свидетельство СССР № 275028, МПК А23К 1/00, С12N 1/00 (аналог).

2. Технические условия ЕКО. 021.755 ТУ Уральского электрохимического комбината. Режим доступа: www.ricon.e-burg.ru.

3. Рекламный проспект на фильтрующие элементы и глушители шума ООО «Композитные материалы». Режим доступа: www.km.skб.ru.

4. Рекламный проспект ОАО «Уралэлектромедь» на изделия антифрикционные пористые. Режим доступа: www.elem.ru/ru/business/production/search/index.php187.

5. Ершова биогаз. Рекламный лист ЗАО «Экопромкомпания». Раздел: очистка сточных вод. 600016. Г. Владимир, ул. Б. Нижегородская, 77.

6. Ткани углеродные РУП СПО «Химволокно». 247400, Светлогорск, ул. Заводская, 5. Режим доступа: www.sohim.open.by.

УДК 662.767.2

М. А. Терпелец, Е. В. Арбузова

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия

А. В. Смотрицкий

ООО «Биоэнергия», г. Екатеринбург, Россия

УВЕЛИЧЕНИЕ ВЫХОДА БИОГАЗА ЗА СЧЁТ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ СУБСТРАТА

Одной из тенденций развития биоэнергетики сегодня является поиск оптимальных методов предварительной обработки сырья, для увеличения выхода биогаза. В статье рассматриваются основные методы предварительной обработки субстрата, их принцип действия и эффективность. Помимо этого, в статье приведены результаты испытаний устройства предварительной подготовки сырья, разрабатываемого компанией Wisesoil.

Ключевые слова: биоэнергетика; предварительная обработка; биогаз; Wisesoil.

М. А. Terpelets, E. V. Arbuzova

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия

A. V. Smotriskii

Bioenergy LLC, Ekaterinburg, Russia

PRETREATMENT OF RAW MATERIAL FOR ENHANCED BIOGAS PRODUCTION

One of the trends in the development of bioenergy today is to find the most optimal pretreatment methods to increase the yield of biogas. The article examines basic methods of pre-treatment of the substrate and their effectiveness. Additionally, this article lists test results of the device of preliminary preparation of raw materials, developed by Wisesoil.

Key words: bioenergy; pre-treatment; biogas; Wisesoil.

БИОЭНЕРГЕТИКА

В настоящее время технологии переработки биологического сырья нашли широкое применение для решения проблемы экологически безопасной утилизации органических отходов, уменьшения загрязнения окружающей среды, а также получения альтернативной энергии. Одна из основных тенденций развития био-

энергетики заключается в поиске наилучших технологий переработки органических отходов с утилизацией биомассы за счет метанового сбраживания с получением биогаза. Биоэнергетические станции по сравнению с традиционными электростанциями являются более экологически безопасными. Они способствуют извлечению окружающей среды от загрязнения всевозможными отходами. Так, например, анаэробная

ферментация – эффективное средство не только реализации отходов животноводства, но и обеспечения экологической чистоты, так как твердые органические вещества становятся менее привлекательными для грызунов и насекомых, а в процессе перегнивания разрушаются болезнетворные микроорганизмы [1].

Однако перед биоэнергетикой стоит ряд проблем. Так, например, сложная структура некоторых видов субстрата с высоким содержанием лигнина и лигноцеллюлоз усложняет переработку данных видов субстрата микроорганизмами. Из-за этого процесс переработки происходит неполностью и растягивается во времени. Для упрощения переработки биомассы и за счёт этого увеличения выхода биогаза могут быть использованы различные виды предварительной обработки. Это особенно важно для малорентабельных производств, где иначе невозможно получить экономическую выгоду.

ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОБРАБОТКА

Предварительная подготовка субстрата необходима для обеспечения высокой эффективности последующего процесса анаэробного сбраживания, а также высокого качества работы используемого технологического оборудования.

Выбор метода предварительной обработки сильно зависит от состава субстрата. Самой большой проблемой для предварительной обработки субстрата является применение к отдельным компонентам субстрата наиболее эффективных методов обработки. Например, субстраты с очень высоким содержанием сухого вещества лучше подходят для измельчения, при условии, что они не содержат никаких камней или металлических фрагментов. Субстраты с высоким содержанием лигнина лучше всего подходят для щелочной предварительной обработки, разумеется в том случае, когда химикаты легко доступны.

Наиболее важным фактором для выбора технологии предварительной обработки является соотношение между затратами и приростом производительности. В большинстве случаев предварительная обработка с малыми затратами энергии слабо влияет на выход биогаза. И наоборот, энергоёмкие методы зачастую наиболее эффективны. Неправильный выбор предварительной обработки может сделать процесс получения газа нерентабельным.

Методы предварительной обработки можно разделить на физические, химические и биологические.

МЕТОДЫ ФИЗИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Суть физических методов обработки в большинстве случаев сводится к измельчению исходного сырья. Достигается это с помощью различных видов физического воздействия: механического (с помощью ножевых либо молотковых мельниц), ультразвукового и электромагнитного.

Измельчение субстрата приводит к увеличению площади сырья, а также в ходе физического воздействия разрушается клеточная структура исходного сырья. Данные факторы и приводят к увеличению выхода биогаза. Так, выход газа увеличивается на 10 % после

того, как сено измельчается в шредере до 0,5 мм. Использование электрокинетической дезинтеграции при обработке сточных вод позволяет получить прирост в выходе биогаза до 20 %. А ультразвуковая обработка, используемая при очистке сточных вод, демонстрирует увеличение выхода газа на 50 %. Исследования, проведённые на кафедре АСиВИЭ УрФУ, показывают, что в результате обработки ультразвуком в биогазе выход легковоспламеняющихся компонентов увеличивается на 34-43 % [2].

МЕТОДЫ ХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Методы химической обработки сводятся к разрушению сложных органических молекул на более простые с помощью химических соединений. Так, выделяют кислотную, щелочную, окислительную обработку и обработку органическими растворителями.

В зависимости от вида субстрата, воздействовать на него можно различными способами. Так, обработка кислотами позволяет гидролизовать целлюлозу, обработка щелочами, органическими растворителями и различными окислителями (например, озоном или кислородом) приводит к гидролизу лигнина и лигноцеллюлоз, что приводит к увеличению содержания простых сахаров, пригодных для переработки микроорганизмами, а значит, к увеличению объёмов выделяемого биогаза.

Исследования показывают, что химические методы обработки повышают эффективность анаэробного сбраживания. Например, предварительная обработка с использованием 3,5 % NaOH на опавших листьях показывает, что выход метана увеличивается на 20 % по сравнению с образцами без обработки [3]. А добавление карбоната натрия в процессе влажного окисления увеличивает выход метана из соломы озимой ржи на 34 % [4].

МЕТОДЫ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Целью биологической обработки является повышение доступности целлюлозы при минимальных потерях углеводов и максимальном удалении лигнина в исходном сырье. Основными методами биологической предварительной обработки являются грибковая предварительная обработка и ферментативная предварительная обработка.

Суть обоих методов заключается в использовании либо микроорганизмов, которые вырабатывают лигнолитические ферменты, либо в использовании ферментов напрямую. Данные ферменты создают низкомолекулярные реакционноспособные соединения, которые осуществляют разложение лигнина.

УСТРОЙСТВО ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ СУБСТРАТА WISESOIL

Разработанное компанией ООО «Биоэнергия» устройство подготовки сырья позволяет модифицировать биогазовые установки. Устройство легко устанавливается на уже действующие биогазовые установки, ускоряя процесс сбраживания в реакторе и повышая выход полезного продукта – биогаза. В 2014-2015 гг.

успешно реализованы пилотные проекты с использованием данного устройства на трех биогазовых установках в России. Технология реализована в модульном решении – устройстве подготовки. Схема установки устройства приведена на рис. 1. Устройство основано на запатентованной технологии и может быть установлено в качестве дополнения перед любым биогазовым реактором. Устройство стоит до 5 % от общей стоимости биогазовой установки и имеет срок окупаемости около 1,5–2 лет.



Рис. 1. Схема установки устройства подготовки субстрата

Данное устройство осуществляет комплексную обработку сырья с использованием нескольких типов воздействий [5]. Ядром устройства является ультразвуковой гидродинамический излучатель, позволяющий создавать поле мощностью до 100 Вт/см^2 . Устройство подвергает сырье мощному ультразвуковому воздействию, под воздействием которого стенки клеток разрушаются и питательные вещества, содержащиеся в них, попадают в окружающую среду. Устройство измельчает сырье на фракции малого размера, сводит к минимуму нарушение бактериальной среды внутри варочного котла за счёт удаления воздуха, ультразвуковой гигиенизации и предварительного нагрева сырья. Сочетание всех этих процессов наделяет исходное сырье высокой реакционной способностью, что упрощает и ускоряет переваривание субстрата, увеличивая, тем самым, выход биогаза. Помимо этого, технология WiseSoil позволяет преобразовать трудноразлагаемые субстраты (например, волокнистые включения, солому и т. д.) в легкодоступный ресурс для производства биогаза. На рис. 2 представлено сравнение необработанной и обработанной соломы.



Рис. 2. Сравнение необработанной (слева) и обработанной (справа) соломы

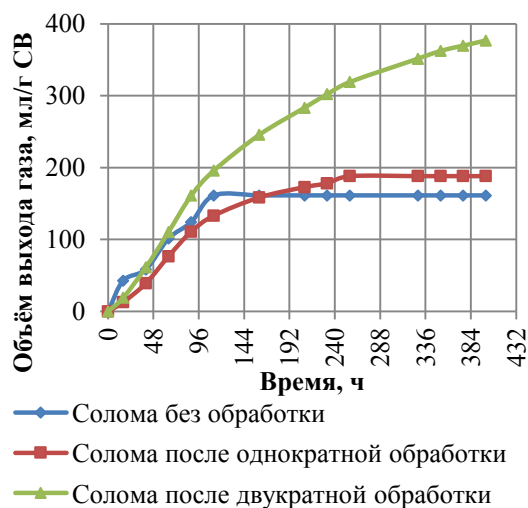


Рис. 3. Динамика образования газа при сбраживании соломы

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ НА ВЫХОД БИОГАЗА

Для исследования того, как влияет предварительная обработка субстрата в устройстве подготовки субстрата на выход газа, был проведен ряд экспериментов, в ходе которых было изучено влияние обработки на скорость выхода и суммарный объем получаемого биогаза. Динамика образования газа из необработанного и обработанного сырья представлена на рис. 3.

Обработка субстрата оказывает положительное влияние на скорость и объем выхода газа из пищевых отходов. Можно заметить, что при однократной обработке суммарный объем выделившегося газа увеличился на 16,6 %, а при двукратной – на 133,5 %.

Можно предположить, что предварительная обработка в устройстве предварительной подготовки сырья, положительно повлияет и на другие виды субстратов.

Прирост в выходе биогаза наблюдается за счёт ряда факторов.

Во-первых, на выход газа сильно влияет диспергация и гомогенизация субстрата. Частоты ультразвука свыше 20 кГц вызывают появление пузырей пара в жидкости, которые постоянно формируются и тут же лопаются, производя ударные волны, которые разрушают крупные частицы субстрата. За счёт этого увеличивается площадь поверхности субстрата, что упрощает доступ к питательным веществам для микроорганизмов.

Во-вторых, на выход газа оказывает влияние ультразвуковая обработка. За счёт воздействия ультразвука распадается клеточная структура и улучшается доступ микроорганизмов к целлюлозе. Разрушение клеток упрощает действие гидролитических ферментов и способствует увеличению скорости гидролиза биомассы.

В-третьих, на выход газа положительное влияние оказывает эффект стерилизации субстрата. Под действием ультразвука микрофлора в исходном субстрате частично погибает. А значит, при попадании в реактор она оказывает меньшее сопротивление микрофлоре реактора, которая пытается подавить исходную микрофлору.

Отчасти эффект стерилизации субстрата можно назвать негативным, поскольку именно аэробная микрофлора, содержащаяся в обрабатываемом субстрате, осуществляет кислотогенез, подготавливая почву для

жизнедеятельности метаногенных микроорганизмов. Однако полной стерилизации в субстрате не наблюдается, а значит, часть микрофлоры всё же выживает. Плюс за счёт других эффектов, а именно за счёт разрушения клеточной структуры субстрата, упрощается доступ к питательным веществам для микроорганизмов и увеличивается скорость их роста, что нивелирует недостатки стерилизации.

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ

Использование установок по обработке субстрата на практике несет большие перспективы.

Во-первых, устройства по предварительной подготовке субстрата позволяют осуществлять гораздо более полную переработку исходного сырья, позволяя микроорганизмам потреблять в пищу более сложные соединения.

Во-вторых, тот факт, что прирост газа из сырья существенно увеличивается, позволяет на некоторых станциях заменить дорогое высококалорийное сырьё на более дешёвые и менее калорийные аналоги без потери мощности.

В-третьих, некоторые методы предварительной обработки могут стабилизировать биогазовые установки, которые имеют проблемы со стабильностью работы.

Предварительная обработка особенно хорошо подходит для субстратов, где разлагаемая биомасса не доступна для действия ферментов. И наоборот, предварительная обработка зачастую не требуется для легко-разлагаемых субстратов.

И, наконец, следует отметить, что невозможно применить одну технологию предварительной обработки ко всем видам субстратов с одинаковой эффективностью.

Субстраты с высоким содержанием сухого вещества лучше подходят для измельчения. Но если они содержат большое количество камней или металлических фрагментов, то данный метод обработки становится недоступен. Субстраты с высоким содержанием лигнина хорошо подходят для щелочной предварительной обработки, но если химикаты труднодоступны, то и обработка существенно вырастет в цене. В данной ситуации всё решает технико-экономическое обоснование для каждой установки.

Сегодня, биогазовые установки используются преимущественно для утилизации отходов. Однако, при грамотном подборе метода предварительной подготовки субстрата, количество дополнительно получаемого биогаза сделает рентабельной не только утилизацию отходов, но и производство энергии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Баадер В., Доне Е., Бренндерфер М. Биогаз. Теория и практика. (Перевод с немецкого и предисловие М.И. Серебряного.) – М. Колос, 1982 – 148 с.
2. Щеклеин С.Е., Чугунов А.В., Арбузова Е.В. Anaerobic conversion of biomass upon disintegration in ultrasonic fields of low intensity – УрФУ, Россия.
3. Liew, L.N., Shi, J., Li, Y. Enhancing the solid-state anaerobic digestion of fallen leaves through simultaneous alkaline treatment. – Bioresource Technology, 2011. – №102.
4. Petersson A, Thomsen MH, Hauggaard-Nielsen H, Thomsen AB. Potential bioethanol and biogas production using lignocellulosic biomass from winter rye, oilseed rape and faba bean. – Biomass Bioenergy, 2007.
5. Повышение экономической эффективности биогазовых установок [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://wisesoil.ru/> – Загл. с экрана.

621.0

Р. В. Радченко, В. В. Тюльпа

УрФУ имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия

ЭКСЕРГЕТИЧЕСКИЙ И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ МЕТОДЫ СРАВНЕНИЯ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ

В статье описан метод, позволяющий оценить достоинства и недостатки накопителей энергии различных типов. *Ключевые слова:* накопитель; эксергия; термодинамическое совершенство.

R. V. Radchenko, V. V. Tulpa

Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

EXERGY AND THERMODYNAMIC METHOD OF COMPARING ENERGY STORAGE DEVICES

The article presents a method to evaluate the advantages and disadvantages of energy storage devices of different types. *Key words:* energy storage; exergy; thermodynamic perfection.

Одним из направлений повышения надежности и безопасности работы объектов энергетики является введение в их состав различных накопителей энергии.

Накопители, заряжаемые в периоды пониженной потребности в энергии и разряжаемые в периоды повы-

шенной ее потребности, обеспечивают работу оборудования электростанции в базовом режиме.

Кроме того, появляется возможность выработки дополнительного количества энергии с помощью специальных пиковых контуров для отдачи ее потребителю либо для расходования на собственные нужды [1-5].

Под накопителем энергии принято понимать [1] устройство, позволяющее накапливать в нём энергию какого-либо вида в течение периода заряда $t_{\text{зар}}$ и передавать существенную часть этой энергии нагрузке в течение периода разряда $t_{\text{раз}}$. Взаимосвязь параметров накопителя при заряде и разряде определяется соотношением

$$P_{\text{зар}} \cdot t_{\text{зар}} \cdot \eta = P_{\text{раз}} \cdot t_{\text{раз}}, \quad (1)$$

где $P_{\text{зар}}$ и $P_{\text{раз}}$ – средние значения мощностей процессов заряда и разряда соответственно. В зависимости от технического назначения накопителя значения входных и выходных параметров могут существенно отличаться.

Развитие науки и техники обусловило появление большого количества типов накопителей энергии, отличающихся характером протекания физических, химических и других процессов, принципом действия, конструктивным исполнением, технологией изготовления и другими характеристиками. При большом разнообразии типов накопителей, наряду с возрастающим объемом их применения в различных сферах, возникает задача выбора того или иного типа накопителя, для чего необходимо обозначить критерии их сопоставления [4].

Весь спектр требований к накопителям можно разделить на две группы:

- требования, связанные с конкретным способом использования данного накопителя;
- требования, связанные с его энергетическими характеристиками.

Требования второй группы относятся к накопителям любых типов и фактически определяют целесообразность применения того или иного накопителя в каждом конкретном случае. Прежде всего, это такие показатели, как КПД заряда, КПД хранения и КПД разряда.

При выборе накопителя эти показатели являются определяющими, так как от них зависит величина общего эффекта применения накопителя. Использование накопителя становится неэффективным, если за время процесса заряда и хранения какая-то значительная часть энергии будет потеряна вследствие несовершенства накопителя (саморазряд, трение), т. е. существует связь со временем хранения энергии.

В качестве абсолютной меры степени термодинамического совершенства любой технологической системы чаще всего принимается удельная (отнесенная к единице конечной или промежуточной продукции) величина подвода энергии от внешнего источника. При таком подходе по умолчанию принимается, что все выходящие из системы тепловые потоки отводятся в окружающую среду, т. е. не участвуют в процессе теплопередачи и не могут совершать полезную работу. В качестве относительной меры термодинамического

совершенства здесь выступают тепловые и термические КПД.

Недостатком рассмотренных КПД является невозможность оценки степени термодинамического совершенства рассматриваемой энерготехнологической системы. Составленные на основе закона сохранения энергии, они лишь определяют степень совершенства теплоизоляции и, в некоторых случаях, отвода энергии и вещества в окружающую среду. При использовании составляющих энергетического баланса качественное различие входящих в него величин не учитывается, поскольку с позиций первого закона термодинамики все формы энергии равноценны.

При таком подходе из исследования выпадает оценка работоспособности вещества и потоков энергии, рассматриваемых в условиях окружающей среды. Только зная ресурсы энергии, пригодной для превращения в другие виды энергии (а, следовательно, и для практического использования), в любой части рассматриваемого процесса, можно получить полную информацию, необходимую для термодинамического анализа данного агрегата.

В последнее время количество различных процессов, изучаемых методами технической термодинамики, увеличилось, а многие процессы стали значительно сложнее. Появились новые типы теплосиловых установок (атомные, парогазовые, магнитогидродинамические). Наряду с теплосиловыми установками внедряются в технику теплоиспользующие и холодильные установки различных типов, установки сжижения газов и разделения газовых смесей, термоэлементы, фотоэлементы, топливные элементы и др. В некоторых из этих установок осуществляется разомкнутый процесс с вводом и выводом рабочего тела из системы, в других важное место занимают химические процессы. В ряде установок вообще отсутствует движение рабочего тела или изменение его состояния. Понятие энергии как общей меры движения материи в рассматриваемой системе недостаточно при решении технических задач. Техническая ценность энергии зависит не только от ее собственных параметров и формы, но и от параметров окружающей среды. Таким образом, не всякая энергия и не при всех условиях может быть целиком пригодна для практического использования.

Окружающая среда характеризуется тем, что ее параметры не зависят от параметров рассматриваемой системы и в большинстве задач могут считаться постоянными. Примерами такой среды могут быть атмосфера, морская вода, космическое пространство.

Во всех энергетических превращениях, обеспечивающих работу технических систем, может использоваться энергия двух видов:

- энергия, полностью превратимая в любой другой вид энергии, независимо от параметров окружающей среды – «организованная» форма энергии. Это, например, механическая, электрическая или химическая энергия;
- энергия, которая не может быть полностью превращена в другой вид энергии; ее превратимость опреде-

ляется как собственными параметрами, так и параметрами окружающей среды – «неорганизованная» форма энергии. Например, энергия, передаваемая в виде теплового потока, энергия излучения и т. д.

Общей мерой для всех видов энергии, характеризующей способность их преобразования в другие виды организованной энергии, их превратимость, была названа эксергией системы [5]. Эксергия системы в данном состоянии измеряется количеством механической или другой полностью превратимой энергии, которая может быть получена от системы в результате ее обратимого перехода из данного состояния в состояние равновесия с окружающей средой. Та часть энергии системы, которая не может быть превращена в организованную энергию, получила название анергии.

При определении эксергии объектом рассмотрения являются, прежде всего, сама система, затем окружающая среда и, наконец, внешние объекты в окружающей среде, которые могут служить источниками или приемниками энергии. Эксергия, как и энергия системы, в каждом данном состоянии имеет фиксированное значение.

Таким образом, взаимодействие системы с окружающей средой может проходить как обратимо (идеальный процесс), так и необратимо (реальный процесс). В идеальном обратимом процессе будет получена работа, равная убыли эксергии. В реальном процессе работа будет меньше, чем убыль эксергии, так как часть эксергии исчезнет, будет потеряна, т.е. если взаимодействие системы и окружающей среды протекает необратимо, с возрастанием энтропии, то эксергия системы уменьшается.

Представим величины эксергии, вводимые и выводимые из системы (установки) в единицу времени как $EX(t)_{\text{зар}}$ и $EX(t)_{\text{раз}}$, соответственно.

Разность значений общей величины эксергии $\int_0^{t_{\text{зар}}} EX(t)_{\text{зар}} dt$, вводимой в данную систему (установку), и величины эксергии $\int_0^{t_{\text{раз}}} EX(t)_{\text{раз}} dt$, выводимой из нее, определяет суммарную величину потерь EX_{Π} от необратимости в системе:

$$\int_0^{t_{\text{зар}}} EX(t)_{\text{зар}} dt - \int_0^{t_{\text{раз}}} EX(t)_{\text{раз}} dt = EX_{\Pi}. \quad (2)$$

Только в обратимых процессах $EX_{\Pi} = 0$, так как отсутствует диссипация энергии.

Отношение эксергии, отводимой из системы, к подведенной эксергии представляет собой эксергетический КПД, который характеризует степень приближения системы к идеальной:

$$\eta_{EX} = \frac{\int_0^{t_{\text{раз}}} EX(t)_{\text{раз}} dt}{\int_0^{t_{\text{зар}}} EX(t)_{\text{зар}} dt} = \frac{\int_0^{t_{\text{зар}}} EX(t)_{\text{зар}} dt - EX_{\Pi}}{\int_0^{t_{\text{зар}}} EX(t)_{\text{зар}} dt} = 1 - \frac{EX_{\Pi}}{\int_0^{t_{\text{зар}}} EX(t)_{\text{зар}} dt} \quad (3)$$

В системе с идеальными процессами $\eta_{EX} = 1$, для системы с реальными процессами $\eta_{EX} \leq 1$. Потери EX_{Π} делятся на две группы по их локализации:

– внутренние потери $EX_{\Pi}^{\text{ин}}$, связанные с необратимо-

стью процессов, протекающих внутри системы (трение в машинах и устройствах, джоулевы потери, гидравлическое сопротивление, дросселирование, тепло-массообмен при конечных температурных напорах и др.);

– внешние потери $EX_{\Pi}^{\text{е}}$, связанные с условиями взаимодействия системы с окружающей средой и другими источниками, приемниками энергии (потери через тепловую изоляцию, потери с продуктами, выходящими из установки, эксергия которых не используется и др.).

Деление потерь на внутренние и внешние связано с различными путями их уменьшения. Внутренние потери связаны с несовершенством отдельных элементов, составляющих анализируемую установку, или процессов в этих элементах.

Изменение энтропии такой системы складывается из внутренних изменений $d_i S$ энтропии и ее притоком или оттоком в систему $d_e S$ из-за теплообмена с окружающей средой и в результате обмена веществом. Следовательно, общее изменение энтропии системы dS равно

$$dS = d_i S + d_e S. \quad (4)$$

Знак $d_e S$ может быть, как положителен, так и отрицателен в зависимости от конкретных условий, т. е. приток энтропии может быть больше или меньше ее оттока. Поэтому, согласно формуле (4) изменение энтропии в системе может быть, как больше, так и меньше нуля.

Если в системе нет производства энтропии, т. е. $d_i S = 0$, а имеется лишь поток теплоты, тогда

$$dS = d_e S = \frac{dQ}{T},$$

но этот поток может быть направлен как в систему, так и из системы, т. е. $d_e S$ может быть как больше, так и меньше нуля.

Путем последовательного применения к отдельным элементам установки можно установить распределение в них внутренних и внешних потерь. Для стационарного процесса

$$EX_{\Pi}^{\text{е}} + EX_{\Pi}^{\text{ин}} = EX_{\text{зар}} - EX_{\text{раз}} \quad (5)$$

При анализе внутренних потерь накопителя необходимо учитывать, что полный цикл его работы состоит из трёх последовательных процессов: периода накопления энергии (заряд) за время $t_{\text{зар}}$, периода хранения накопленной энергии $t_{\text{хр}}$, периода выдачи накопленной энергии (разряд) $t_{\text{раз}}$. Полный эксергетический КПД является произведением КПД этих процессов.

$$\eta_{EX} = \eta_{EX}^{\text{зар}} \cdot \eta_{EX}^{\text{хр}} \cdot \eta_{EX}^{\text{раз}}. \quad (6)$$

Здесь

$$\eta_{EX}^{\text{зар}} = \frac{\int_0^{t_{\text{зар}}} EX(t)_{\text{зар}} dt - EX_{\Pi}^{\text{зар}}}{\int_0^{t_{\text{зар}}} EX(t)_{\text{зар}} dt} = 1 - \frac{EX_{\Pi}^{\text{зар}}}{\int_0^{t_{\text{зар}}} EX(t)_{\text{зар}} dt}, \quad (7)$$

где $EX_{\Pi}^{\text{зар}} = EX_{\Pi}^{\text{ин}}_{\text{зар}}$.

Потери эксергии при заряде накопителя

$$EX_{II}^{zap} = T\Delta S_{zap} = T \int_0^{t_{zap}} \frac{dS_{zap}}{dt} dt \quad (8)$$

Время заряда и разряда непосредственно связаны между собой, так как $\int_0^{t_{раз}} EX(t)_{раз} dt$ является «паспортной» характеристикой накопителя. В то же время t_{xp} может меняться в широких пределах в зависимости только от внутренних потерь выбранного типа накопителя. Выражение для КПД хранения существенно зависит от величины заряда и времени его хранения. Потери эксергии в накопителе происходят при хранении и природа их тепловая, т. е.

$$EX_{II}^{xp} = T\Delta S_{xp} = T \int_0^{t_{xp}} \frac{dS_{xp}}{dt} dt, \quad (9)$$

$$\eta_{EX}^{xp} = \frac{\int_0^{t_{zap}} EX(t)_{zap} dt - EX_{II}^{xp}}{\int_0^{t_{zap}} EX(t)_{zap} dt} = 1 - \frac{EX_{II}^{xp}}{\int_0^{t_{zap}} EX(t)_{zap} dt}. \quad (10)$$

Энергия, которая может быть использована при разряде накопителя,

$$\int_0^{t_{xp}} EX(t)_{xp} dt = \int_0^{t_{zap}} EX(t)_{zap} dt - T\Delta S_{xp} \quad (11)$$

$$\eta_{EX}^{раз} = \frac{\int_0^{t_{xp}} EX(t)_{xp} dt - EX_{II}^{раз}}{\int_0^{t_{xp}} EX(t)_{xp} dt} = 1 - \frac{EX_{II}^{раз}}{\int_0^{t_{xp}} EX(t)_{xp} dt} \quad (12)$$

Потери эксергии при разряде накопителя

$$EX_{II}^{раз} = T\Delta S_{раз} = T \int_0^{t_{раз}} \frac{dS_{раз}}{dt} dt \quad (13)$$

Потери эксергии при разряде накопителя зависят от условий передачи энергии потребителю, т. е. в соответствии с (5) необходимо учитывать потери энтропии $d_e S$ во внешней системе.

Для составления эксергетического баланса системы необходимо изучить метод определения эксергии для энергий тех видов, которые применяются в технических системах накопителя рассматриваемого типа.

Получив значения эксергий для различных видов энергии, можно перейти к составлению эксергетических балансов для системы и отдельных ее элементов, расчету эксергетических КПД, определению относительных и абсолютных потерь эксергии в них, что позволяет наметить основные пути совершенствования, как отдельных элементов, так и системы в целом. Использование эксергии в различных задачах технической термодинамики позволяет решать задачи на основе единой логически построенной методики.

Современная техника всё шире использует в качестве перезаряжаемых источников тока энергонакопительные электрические конденсаторы (суперконденсаторы или ионисторы), имеющие ряд преимуществ перед аккумуляторами [6, 7]:

– они могут эксплуатироваться в широком интервале температур (от -60 до $+125^\circ\text{C}$ и выше) без обслуживания и замены в течение всего срока службы (до 20 лет и более);

– имеют большое количество циклов в режиме «зарядка-разрядка» ($> 10^6$ циклов) без заметного ухудшения параметров;

– имеют высокую удельную мощность (десятки кВт/кг) и, благодаря небольшой постоянной времени RC , заряжаются и разряжаются очень быстро (практически мгновенно).

Если обычный конденсатор представляет собой обкладки из фольги, разделенные диэлектриком, то ионистор – это комбинация конденсатора с электрохимической батареей – электрохимический конденсатор ЭХК. В нем применяются специальные материалы для обкладок и электролит. В качестве обкладок используются материалы одного из трех типов: обкладки большой площади на основе активированного угля, оксиды металлов и проводящие полимеры.

Использование высокопористых угольных материалов позволяет достичь плотности емкости порядка 10 Ф/см^3 и больше. Ионисторы на базе активированного угля наиболее экономичны в изготовлении. Их еще называют двухслойными или ДЭС – конденсаторами, потому что заряд сохраняется в двойном слое, образующемся на поверхности обкладки.

Схема замещения суперконденсатора практически совпадает со схемой обычного конденсатора [11].

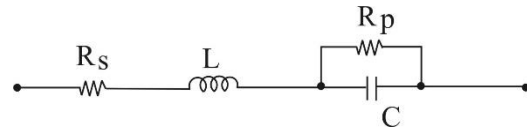


Рис. 1. Схема замещения суперконденсатора: L – индуктивность потерь, R_p – сопротивление утечки, C – емкость ЭХК, R_S – общее активное сопротивление (сопротивление потерь)

Общее сопротивление потерь R_S обычно разбивают на две составляющие:

$$R_S = ESR + EDR,$$

где ESR – сопротивление потерь, как у обычных конденсаторов, EDR – эквивалентное распределенное сопротивление, определяемое ионными токами в двойном электрическом слое. Сопротивление утечки R_p связано со структурой ДЭС и зависит от типа конденсатора.

1. Процесс заряда накопителя

В процессе заряда потери энтропии при изобарно-изотермическом процессе в единицу времени

$$\frac{d_i S}{dt} = \frac{dS_{zap}}{dt} = \frac{V_C I}{T} = \frac{V_C}{T} \frac{dq}{dt} = \frac{1}{T} \frac{d}{dt} \left(\frac{CV_C^2}{2} \right). \quad (14)$$

Здесь V_C – рабочее напряжение конденсатора, dq/dt – количество передаваемого в единицу времени заряда, C – ёмкость конденсатора, T – температура окружающей среды.

Если ёмкость суперконденсатора C , а время заряда $t_{\text{зар}}$, напряжение на конденсаторе в момент времени t

$$V_C = V_{C0} \left(1 - e^{-\frac{t}{R_S C}} \right) \quad (15)$$

Здесь R_S – сопротивление потерь в цепи, V_{C0} – номинальное напряжение заряда суперконденсатора.

Изменение энтропии в процессе заряда

$$\begin{aligned} \Delta S_{\text{зар}} &= \frac{1}{T} \int_0^{t_{\text{зар}}} \frac{d}{dt} \left(\frac{CV_C^2}{2} \right) dt = \\ &= \frac{1}{T} \frac{CV_{C0}^2}{2} \int_0^{t_{\text{зар}}} \frac{d}{dt} \left(1 - e^{-\frac{t}{R_S C}} \right)^2 dt \end{aligned} \quad (16)$$

или

$$\Delta S_{\text{зар}} = \frac{1}{T} \frac{CV_{C0}^2}{2} \left(1 - e^{-\frac{t_{\text{зар}}}{R_S C}} \right)^2 \quad (17)$$

Подставляя (17) в (7), получим эксергетический КПД процесса заряда суперконденсатора

$$\eta_{EX}^{\text{зар}} = e^{-\frac{t_{\text{зар}}}{R_S C}} \left(2 - e^{-\frac{t_{\text{зар}}}{R_S C}} \right) \quad (18)$$

2. Процесс хранения заряда

Потери эксергии в конденсаторе при хранении в случае изобарно-изотермического процесса происходят в виде тепловых потерь, т.е. $\Delta S_{\text{зар}} \leq 0$ и выделяющееся тепло необходимо отводить.

Изменение энтропии в процессе хранения заряда

$$\frac{dS_{\text{xp}}}{dt} = \frac{V_C I}{T} = \frac{V_C}{T} \frac{dq}{dt} = \frac{1}{T} \frac{d}{dt} \left(\frac{CV_C^2}{2} \right) \quad (19)$$

Потери энтропии в суперконденсаторе

$$\Delta S_{\text{xp}} = \frac{1}{T} \cdot EX_{\Pi}^{\text{xp}} = \frac{1}{T} \int_0^{t_{\text{xp}}} \frac{d}{dt} \left(\frac{CV_C^2}{2} \right) dt \quad (20)$$

Учитывая, что

$$V_C = \frac{q}{C} = \frac{q_0}{C} e^{-\frac{t}{R_S C}} = V_{C0} e^{-\frac{t}{R_S C}},$$

получим

$$\Delta S_{\text{xp}} = \frac{1}{T} \frac{CV_{C0}^2}{2} \left(e^{-\frac{2t_{\text{xp}}}{R_S C}} - 1 \right) \quad (21)$$

Эксергетический КПД накопителя в процессе хранения

$$\eta_{EX}^{\text{xp}} = 1 + \left(e^{-\frac{2t_{\text{xp}}}{R_S C}} - 1 \right) = e^{-\frac{2t_{\text{xp}}}{R_S C}} \quad (22)$$

3. Процесс разряда накопителя

В результате необратимых потерь, связанных с процессом хранения, полезная энергия, которая может быть использована потребителем, как следует из (8), равна $\int_0^{t_{\text{xp}}} EX(t)_{\text{xp}} dt$.

$$\int_0^{t_{\text{xp}}} EX(t)_{\text{xp}} dt = \int_0^{t_{\text{зар}}} EX(t)_{\text{зар}} dt - T \Delta S_{\text{xp}} =$$

$$\begin{aligned} &= \int_0^{t_{\text{зар}}} \frac{d}{dt} \left(\frac{CV_C^2}{2} \right) dt - \Delta S_{\text{xp}} = \\ &= \frac{CV_{C0}^2}{2} \left\{ \int_0^{t_{\text{зар}}} \left(1 - e^{-\frac{t}{R_S C}} \right)^2 dt - \left(e^{-\frac{2t_{\text{xp}}}{R_S C}} - 1 \right) \right\} \\ &= \frac{CV_{C0}^2}{2} \left\{ \left(1 - e^{-\frac{t_{\text{зар}}}{R_S C}} \right)^2 - \left(e^{-\frac{2t_{\text{xp}}}{R_S C}} - 1 \right) \right\} \end{aligned} \quad (23)$$

Изменение энтропии такой системы складывается из внутренних изменений $d_i S$ энтропии и ее оттоком из системы $d_e S$ из-за теплообмена с окружающей средой.

Внешние потери EX_{Π}^e , связанные с условиями взаимодействия системы с окружающей средой

$$EX_{\Pi}^{\text{раз}} = T \Delta S_{\text{раз}} = T \int_0^{t_{\text{раз}}} \frac{dS_{\text{раз}}}{dt} dt = \frac{CV_{C0}^2}{2} \left(e^{-\frac{2t_{\text{раз}}}{R_{\text{нар}} C}} - 1 \right) \quad (24)$$

Здесь изменение энтропии $\Delta S_{\text{раз}}$ связано с её оттоком в окружающую среду в виде джоулевых потерь в нагрузке потребителя $EX_{\Pi}^{\text{раз}} \equiv EX_{\Pi}^e$. Поэтому

$$\eta_{EX}^{\text{раз}} = 1 - \frac{e^{-\frac{2t_{\text{раз}}}{R_{\text{нар}} C}} - 1}{\left(\left(1 - e^{-\frac{t_{\text{зар}}}{R_S C}} \right)^2 - \left(e^{-\frac{2t_{\text{xp}}}{R_S C}} - 1 \right) \right)} \quad (25)$$

ОЦЕНКА ЭКСЕРГЕТИЧЕСКОГО КПД СУПЕРКОНДЕНСАТОРА

Время заряда конденсатора $t_{\text{зар}}$ составляет обычно несколько десятков секунд (ограничивается только максимально допустимым током подводящих шин). Можно принять $t_{\text{зар}} = 30$ сек. Сопротивление цепи $R_S = 1$ мОм. Среднее время разряда конденсатора ёмкостью 430 фарад из-за утечки до уровня 80% составляет 30-45 дней [9]. Поэтому

$$\frac{q_{\text{ут}}}{q} \approx 0,2 = 1 - e^{-\frac{t_{\text{xp}}}{R_P C}},$$

откуда при $t_{\text{xp}} = 2,6 \cdot 10^6$ с, $R_P = 27$ кОм.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гулиа Н.В. Накопители энергии. М: Наука, 1980.
2. Бут Д.А., Алиевский Б.Л., Мизюрин С.Р., Васюкевич П.В. и др. Накопители энергии: Учеб. пособие для вузов. Под ред. Бута Д.А. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 400 с.
3. Рыбалко А.Я., Дыбрин С.В. Критерии сопоставления накопителей энергии // Гірничя електромеханіка та автоматика: Наук.-техн. зб. 2005. Вып. 751.
4. Любарский Б.Г., Шайда В.П., Бураковский С.Г. Сравнительный анализ накопителей энергии для транспортных средств // Залізничний транспорт України, № 6, 2015.
5. Бродянский В.М. Эксергетический метод термодинамического анализа. М.: Энергия, 1973. – 296 с.
6. Burke A. Ultra capacitors: why, how, and where is the technology. // J Power Sources // 2000, V.91, P. 37-50.
7. Spyker RL, Nelms PM. Classical equivalent circuit pa-

rameters for a doublelayer capacitor. // IEEE Trans Aero-space Electr. Syst. // 2000. V.36: P. 829-836.

8. Nesscap Co., Ltd., NESSCAP Tech Guide_2008.pdf.

9. А. Колпаков. Ультраконденсаторы. Maxwell Technologies. Компоненты и технологии, №1, 2004.

УДК 621.31

Е. С. Шульгина, Ю. Е. Немихин

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина,
г. Екатеринбург, Россия

ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ В ПОДРАЗДЕЛЕНИИ «НЕФТЕКАМСКИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЕТИ»

Энергосбережение в Производственном Отделении «Нефтекамские электрические сети». Фактические потери и выполнение программ по снижению потерь электроэнергии на данном предприятии.

Ключевые слова: энергосбережение; электрические сети; потери электроэнергии; снижение потерь.

E. S. Shulgina, Y. E. Nemikhin

Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

ENERGY SAVING IN "NEFTEKAMSK ELECTRICAL NETWORKS" DEPARTMENT

Energy saving in "Neftekamsk electrical networks" Production Department. Actual losses and implementation of programs of reducing energy losses in the enterprise.

Key words: energy conservation; electric networks; loss of power; loss reduction.

ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

В ходе летней производственной практики мною были рассмотрены вопросы энергосбережения на производственном отделении «Нефтекамские электрические сети».

Нефтекамские электрических сети образованы 1 января 1964 года на базе бывшего Северного района высоковольтных сетей, входившего в состав Центральных электрических сетей РЭУ «Башкир-энерго».

Нефтекамские электрические сети одно из самых крупных предприятий Башкирской энергосистемы с общим объемом обслуживания 40044 усл. единиц.

Сейчас в обслуживании НЭС находятся эл. сети 0,4–110 кВ на территории девяти административных районов Республики Башкортостан. В настоящее время сетевое хозяйство ПО НЭС характеризуется следующими показателями:

- площадь обслуживаемой территории 16 334 кв.км;
- количество подстанций – 73;
- количество РЭС – 6;
- количество ТП и РП – 2188;
- протяженность ВЛ 35-110 кВ по трассе – 1460,6 км;
- протяженность по трассе ВЛ 6-10 кВ – 3604,843 км, КЛ 6-10 кВ – 27,006 км, ВЛ 0,4 кВ – 2820,89 км, КЛ 0,4 кВ – 206,475 км;

– установленная мощность ПС 35-110 кВ – 1239,4 МВА.

Полученные и проанализированные данные о фактических потерях электрической энергии и о выполнении программ по снижению потерь электроэнергии в ПО «Нефтекамские электрические сети» позволили сделать краткий вывод о результатах эффективности мероприятий по снижению потерь на предприятии.

На рис. 1 представлена динамика изменения потерь электроэнергии в ПО «НЭС».

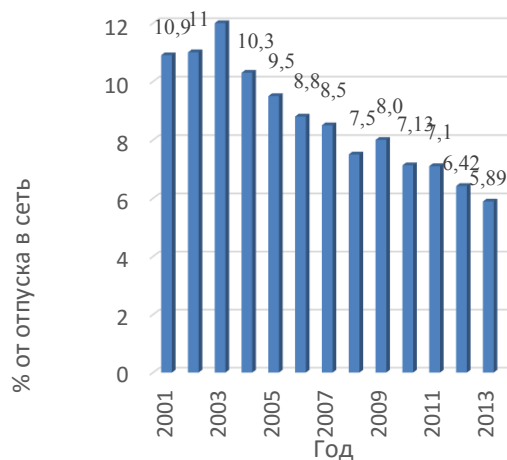


Рис. 1. Динамика изменения потерь электроэнергии в ПО «НЭС»

За последнее десятилетие потери электрической энергии снизились и достигли рекордно-низких величин. В связи с влиянием мирового финансового кризиса на экономику России в период 2008-2009 гг., общее электропотребление снизилось до наименьшего значения последнего двадцатилетия. Падение составило 3,47 % по территории в целом и 3,23 % по городу Нефтекамску. Влияние кризиса сказалось на увеличении потерь электроэнергии в этот период. Однако динамика изменения потерь показывает, что целенаправленное ежегодное проведение мероприятий по снижению потерь даёт позитивный результат.

На диаграммах, изображенных на рис. 2, приведена структура нормативных технологических потерь электрической энергии по уровням напряжения за 2013 г., рассчитанных в программном комплексе РТП-3, а также структура фактических отчётных потерь электроэнергии в ПО «НЭС» за 2013 г. Фактические (отчетные) потери электроэнергии принято определять как разность электроэнергии, поступившей в сеть, и электроэнергии, отпущенной из сети потребителям. Эти потери включают в себя потери в элементах сети, имеющие чисто физический характер, расход электроэнергии на работу оборудования, установленного на подстанциях и обеспечивающего передачу электроэнергии, погрешности фиксации электроэнергии приборами ее учета и, наконец, хищения электроэнергии, неоплату или неполную оплату показаний счетчиков и т. п. Технические же потери электроэнергии, обусловлены физическими процессами в проводах и электрооборудовании, происходящими при передаче электроэнергии по электрическим сетям и выражающимися в преобразовании части электроэнергии в тепло в элементах сетей.

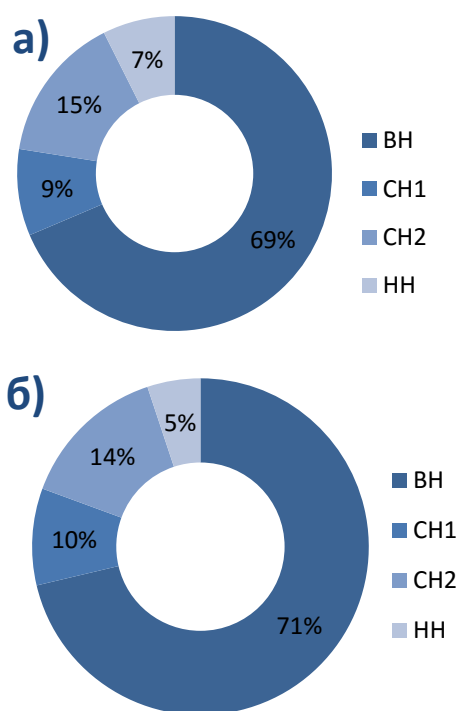


Рис. 2. Потери в ПО «НЭС» в 2013 г.: а) — отчетные; б) технические

Диаграммы, а также результаты проводимых контрольных обходов потребителей доказывают наличие фактов коммерческих потерь электроэнергии. Основные причины неучтенного потребления электроэнергии выявленных при обходах потребителей за 2011-2013 гг. наглядно демонстрирует таблица 1.

Таблица 1

Статистика фактов неучтенного потребления электрической энергии

Наименование выявленного факта неучтенного потребления	Кол-во фактов	%
Безоговорное присоединение к электрическим сетям, наброс на провода	1042	71
Срыв пломб и знаков визуального контроля, несанкционированная замена приборов учёта (без обнаруженных изменений схем)	236	16
Занижение показаний счётчиков, умышленное искажение показаний	85	6
Вмешательство в схему учёта электроэнергии (нарушение фазировки, отключение токовых цепей, шунтирование счётчика), монтаж скрытой электропроводки	41	3,2
Механическое вскрытие счётчика	30	2,1
Неисправность приборов учёта	17	1,1
Потери электроэнергии в бесхозяйных сетях	12	0,6
ИТОГО	1463	100

Учитывая особенность структуры электропотребления, а также характеристику отчётных потерь электроэнергии, в ПО «НЭС» разработана и проводится программа снижения потерь электроэнергии, которая включает в себя следующие мероприятия, разбитые на 3 группы.

Организационные мероприятия:

1. Отключение в режимах малых нагрузок трансформаторов на подстанциях 110/35/10(6) с двумя и более трансформаторами.

Для осуществления этого мероприятия были отобраны двухтрансформаторные подстанции 110/35/10(6) кВ в весенне-летний период которых снижается потребление мощности и становится достаточным использование только одного трансформатора, при этом учитывалась и категория надёжности потребителей подключённых к данным подстанциям.

По такому критерию отбора был составлен список подстанций, на которых в период с мая по сентябрь были отключены вторые трансформаторы. Расчёт снижения потерь электроэнергии за период отключения выполнен с помощью программного комплекса РТП-3. Годовая экономия потерь от выполнения этого мероприятия составила 106,872 тыс.

кВт·ч, а годовой экономический эффект – 160,308 тыс. руб.

2. Выравнивание нагрузок фаз в электросетях 0,4 кВ.

По результатам контрольных замеров за год, был составлен список трансформаторных подстанций 10(6)/0,4 кВ по линиям которых наблюдается значительное неравенство нагрузок фаз и проведено перераспределение нагрузки. Годовая экономия потерь с момента внедрения мероприятия 31,85 тыс. кВт·ч. Годовой экономический эффект 47,775 тыс. руб.

3. Организация целевых рейдов по выявлению коммерческих потерь.

4. Проведение периодических контрольных обходов точек присоединения потребителей;

5. Обеспечение функционирования системы стимулирования персонала к снижению коммерческих потерь электроэнергии;

По факту выявленных безучетных потреблений электрической энергии обходчиками сетевой организацией ПО «НЭС» за 2013 г. было составлено 72 акта о неучтенном потреблении электрической энергии на 392 058 кВт·ч.

По факту выявленных бездоговорного потреблений электрической энергии обходчиками сетевой организацией за 2013 г. было составлено 231 акт о бездоговорном потреблении электрической энергии на 1 079 573 кВт·ч.

6. Составление и анализ небалансов электрической энергии по узлам сети 6-10-35-110кВ и ТП 6-10/0,4 кВ. Расчёт балансов электроэнергии позволяет своевременно выявить неисправные приборы учёта и очаги коммерческих потерь электроэнергии. По итогам 2013 года в результате проведения данного мероприятия полученный эффект составил 409,8 тыс. кВт·ч.

7. Внедрение программного продукта, обеспечивающего автоматизацию процесса регистрации и учета электрической энергии. В ПО «НЭС», как и в остальных производственных отделениях ООО «Башкирэнерго», для автоматизации процесса контроля, учета и расчета полезного отпуска электрической энергии у юридических лиц и частных предпринимателей используется программный комплекс (ПК) «CDS:Энергия». У бытовых потребителей используется программный комплекс (ПК) «АВСети». В совокупности получившийся программный комплекс повышает точность и упрощает расчет полезного отпуска электроэнергии и балансов электроэнергии, позволяет согласованно вести базу данных по потребителям электроэнергии, что улучшает качество работы с клиентами.

8. Обучение персонала.

Технические мероприятия:

1. Замена проводов на перегруженных линиях 0,4-10 кВ.

2. Замена перегруженных и установка и ввод в работу дополнительных силовых трансформаторов на эксплуатируемых ТП 6-10/0,4 кВ.

3. Замена недогруженных силовых трансформаторов 6-10/0,4 кВ.

4. Замена ответвлений от ВЛ 0,38 кВ к зданиям.

5. Оптимизация нагрузки электросетей за счет строительства: линий 6-10 кВ; линий 0,4 кВ; ТП 6-10/0,4 кВ.

6. Разукрупнение распределительных линий 0,4 кВ.

Так как все технические мероприятия имеют очень большой срок окупаемости основной экономический эффект от их проведения достигается за счёт повышения надёжности, качества электроснабжения потребителей и рассматривается в совокупности с другими эффектами.

Мероприятия по совершенствованию систем учета электроэнергии:

1. Установка приборов учета электрической энергии на фасадах домов у граждан-потребителей.

Потери в 2013 г. уменьшились на 999878 кВт·ч.

2. Установка приборов учета электрической энергии на ТП 6-10/0,4 кВ и установка контрольных узлов учета электрической энергии в точках поступления от смежных сетевых организаций позволили определить узлы с большими коммерческими потерями, выявить неисправные приборы учёта, определить эффективность работы отдельных подразделений. Что, в свою очередь, позволяет планировать работу персонала с максимальной эффективностью.

3. Опломбировка приборов учета номерными пломбами.

4. Внедрение АСКУЭ на границах с потребителями.

В Программу «Установка приборов учета с АСКУЭ в центрах питания и на границах балансовой принадлежности в ПО "НЭС" ООО "Башкирэнерго"» 2012 года было включено 2028 приборов учета (на «границах» – 1990, на ТП – 38).

Экономический эффект мероприятия представлен в таблице 2.

Таблица 2
Эффект от внедрения АСКУЭ в 2012 г.
по ПО «НЭС»

Данные за год до установки АСКУЭ – 2011 г.		Данные за год после установки АСКУЭ – 2012 г.	
Потери за 2011 год, кВт·ч	%	Потери за 2012 год, кВт·ч	%
3 906 170	45,5	546 232	8,7

ВЫВОДЫ

Проводимые мероприятия по снижению потерь электроэнергии в ПО «НЭС» позволили существенно снизить отчётные потери электроэнергии. Внедрение АСКУЭ на границах с потребителями является одним из наиболее эффективных мероприятий по снижению потерь электроэнергии. Наиболее эффективным способом борьбы с несанкционированным электропотреблением являются рейды по выявлению нарушителей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Малый В.В. Бизнес-план по снижению потерь электроэнергии в БашРЭС: дис. канд. экон. наук: 08.00.05 / Владимир Владимирович Малый; Уральский федеральный ун-т. им. первого Президента России Б.Н. Ельцина. – Екатеринбург, 2013. – 153 с.

2. Воротницкий В.Э. Структура и снижение коммерческих потерь электроэнергии в электрических сетях // Материалы докладов международного научно-технического семинара «Современные методы и средства расчета, нормирования и снижения технических и коммерческих потерь электроэнергии в электрических сетях», Москва, 2000.

3. Бохмат И.С., Воротницкий В.Э., Татаринов Е.П. Снижение коммерческих потерь в электроэнергетических системах // "Электрические станции", 1998. – №9.

3. Воротницкий В. Э., Железко Ю.С. Максимов В.М. Инструкция по снижению технологического расхода электрической энергии на передачу по электрическим сетям энергосистем и энергообъединений: РД 34.09.254, ВНИИЭ, 1986.

4. Приказ РАО ЕЭС России №432 от 7 августа 2000 года «О создании современных систем учета и контроля за энергопотреблением».

УДК 519.6

Ю. А. Каграманов, В. Г. Тупоногов, А. Ф. Рыжков

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина,
г. Екатеринбург, Россия

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ СЕРООЧИСТКИ СИНТЕЗ ГАЗОВ

В ходе экспериментов на термогравиметрическом анализаторе были определены кинетические характеристики чистой окиси цинка ГОСТ 10262-73 и динамические характеристики сорбента Katalco 32-4 Johnson&Matthey. Полученные данные позволили рассчитать объем сорбента, достаточный для полной очистки газа от сероводорода; длительность рабочего цикла сорбента; степень конверсии сорбента, а также основные кинетические характеристики реакции поглощения сероводорода оксидом цинка. Моделирование химических процессов с учетом нестационарной гидродинамики позволило спрогнозировать степень конверсии оксида цинка марки Zn2OSC на разных изотермах, а также параметры процесса с чистой окисью цинка и с сорбентом Katalco в диапазоне температур 250 – 950 °С.

Ключевые слова: сероочистка; сероводород; оксид цинка; кинетика; нестационарная многофазная гидродинамика.

Y. A. Kagramanov, V. G. Tuponogov, A. F. Ryzhkov

Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

SIMULATION OF SYNGAS DESULFURIZATION SYSTEM

Ural Federal University, Mira str., 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: kagramanovya@yandex.ru

Thermogravimetric experiments determined kinetic characteristics of clean zinc oxide, and dynamic characteristics of Katalco 32-4 Johnson&Matthey sorbent. Obtained data let to count the volume of the sorbent enough for full synth gas hydrogen sulfide clean up, the length of working cycle, conversion of sorbent, and general kinetics characteristics of hydrogen sulfide absorption by zinc oxide. Chemical process simulation with considering transient multiphase hydrodynamics forecasted conversion of oxide zinc mark ZnO2SC on different isotherms and process parameters for clean zinc oxide and Katalco sorbent in range of temperatures 250 – 950 °С.

Key words: desulfurization; hydrogen sulfide; zinc oxide; kinetics; transient multiphase hydrodynamics.

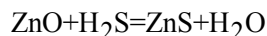
ВВЕДЕНИЕ

Синтез газ активно используется в мини тэц, парогазовых установках с внутрицикловой газификацией твердых топлив, в топливных элементах, так же широкое применение находит синтез газ из биомассы. Для эффективной и бесперебойной работы таких

установок, а также для выполнения норм экологической безопасности должны быть предусмотрены соответствующие системы очистки синтез газа. Существует множество методов очистки газа от сероводорода, одним из которых является сухая глубокая среднетемпературная сероочистка, основанная на адсорбционном методе поглощения сероводорода

сорбентами на основе оксидов металлов, в частности на основе оксида цинка.

Для определения кинетических характеристик химических реакций сорбентов с сероводородом используется метод термогравиметрического анализа. Исследования проводились на мелкодисперсных сорбентах на основе оксида цинка. В работах [1, 2] показано, что реакция поглощения сероводорода оксидом цинка



является реакцией первого порядка. Общее уравнение кинетики реакции выглядит, как

$$\frac{dX}{d\tau} = k_{co} \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \cdot f(X) \quad (1)$$

где $X_i = \frac{m_0 - m_t}{m_0}$, $f(X) = (1 - X)^{n_1}$. Для объемной мо-

дели и модели стягивающегося ядра $n_1 = 1$, $n_1 = 2/3$ соответственно.

В общем случае кинетика крупных (2 – 3 мм) сорбентов на основе оксида цинка может быть описана моделью сжимающегося ядра, что было показано в работах [1, 2]. Однако при исследованиях на ТГА использовался мелкодисперсный порошок 100 мкм. Кинетика мелкодисперсного (50 – 100 мкм) порошка окиси цинка описывается объемной моделью, в которой отсутствует невзаимодействующее ядро, частицы порошка настолько малы, что газ равномерно заполняет их объем. Ниже представлена принципиальная схема экспериментального стенда ТГА.

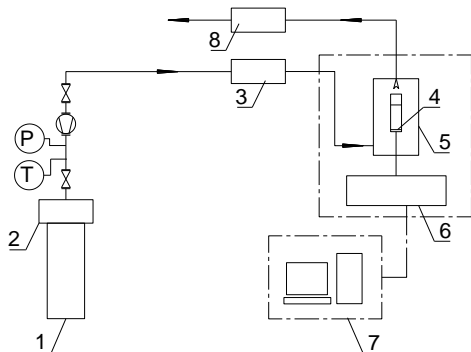


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментального стенда термогравиметрического анализа: 1 – баллон со смесью аргона и сероводорода, 2 – редуктор, 3 – газоанализатор на входе в реактор, 4 – навеска с образцом, 5 – корпус реактора, 6 – весы, 7 – расчетный блок, 8 – газоанализатор на выходе из реактора

В ходе экспериментов определяли степень конверсии, предэкспоненциальный множитель, энергию активации.

На рис. 2 представлен образец порошка окиси цинка (ГОСТ 10262-73. Реактивы. Цинка окись. Технические условия), помещенный на навеску термогравиметрического анализатора перед нагревом в реакторе. Массовая доля окиси цинка (ZnO) не менее 99,5 %.



Рис. 2. Навеска термогравиметрического анализатора с чистой окисью цинка

В качестве газа использовалась смесь с однопроцентным содержанием сероводорода в аргоне. Нормальный расход газа составлял 0,2 – 0,3 л/мин. Навеска заполнялась окисью цинка с размером частиц 0,05 – 0,1 мм и начальной массой 16,99 мг (при комнатной температуре). При температуре 250 °С в реактор была пущена смесь сероводорода и аргона, вес показал значение в 19,1 мг. Исследования проводились при изменении температуры от 250 до 950 °С со скоростью 20 К/мин.

Кинетика мелких частиц окиси цинка может быть описана объемной моделью не на всем временном участке. При комнатной температуре частицам свойственно слипание в комки диаметром 1 мм. При механическом воздействии окись цинка прилипает к алюминиевым стенкам и с трудом поддается очистке. После опытов, равномерно рассыпанный по держателю (диаметр держателя 15 мм) порошок окиси цинка превратился в расплавленную, а затем затвердевшую массу. После анализа зависимости константы скорости реакции от обратной температуры был выявлен участок, заключенный между m_1 и m_2 , на котором кинетика реакции соответствует объемной модели.

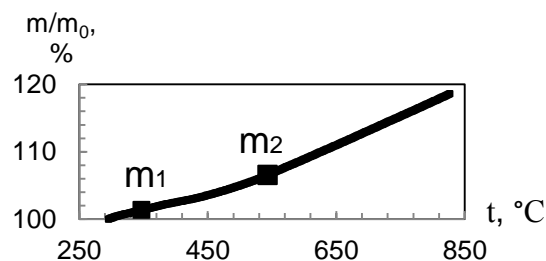


Рис. 3. Прирост массы по температуре

После преодоления температурной отметки в 511 °С угол наклона прямой увеличился, что говорит о более интенсивном прохождении реакции.

Температурная отметка в 511 °С была достигнута на 10-й минуте, после чего заметно незначительное увеличение скорости реакции.

Предэкспоненциальный множитель и энергия активации определяются при линеаризации зависимости константы скорости реакции от температуры:

$$\ln(R_t) = \ln(k_{co}) + \left(-\frac{E_a}{R}\right) \frac{1}{T} \quad (2)$$

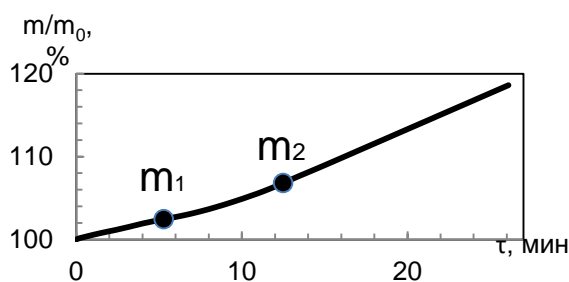


Рис. 4. Прирост массы во времени

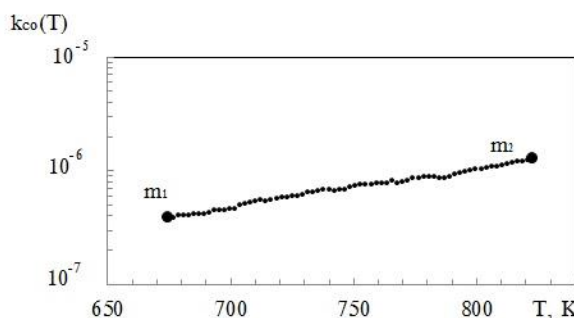


Рис. 5. Зависимость константы скорости реакции от температуры

Значения предэкспоненциального множителя и энергии активации приведены в табл. 1.

Таблица 1

Кинетические константы		
Средние константы в интервале температур (300 – 510 °C)		
E_a , кДж/моль	k_{so} , 1/с	n_1
35,7	0,00023	1

В качестве образца был взят промышленный сорбент крупного гранулометрического состава Katalco 32-4 Johnson Matthey, плотностью 2900 кг/м³. Химический состав сорбента: 60 – 90 % чистой окиси цинка, 3 – 7 % оксида алюминия, 3 – 7 % оксида кальция. В качестве навески был взят один шарик сорбента диаметром 3 мм массой 92,55 мг. В реактор подавался аргон с содержанием сероводорода 1 % в количестве 0,2 л/мин. Температура в реакторе поднималась с 250 °C до 475 °C в течение 20 минут со скоростью 20 К/мин.

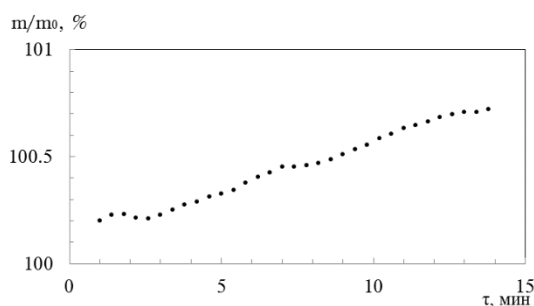


Рис. 6. Прирост массы во времени

Линейная зависимость прироста массы по времени была зафиксирована в ходе опыта.

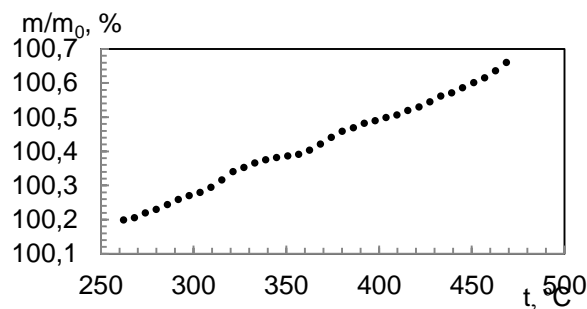


Рис. 7. Прирост массы по температуре

Зависимость прироста массы от температуры была так же линейной на выбранном интервале температур. Прирост массы составил 0,86 мг за 14 минут. Расход оксида цинка на реакцию с сероводородом приведенный к массе навески составляет

$$G_{zno}^p = \frac{m_{14} - m_1}{60(\tau_{14} - \tau_1)m_0} = \frac{0,86 \cdot 10^{-6} \text{ кг ZnO}}{60 \cdot 14 \cdot 92,55 \cdot 10^{-6} \text{ кг сорбента}} = 1,11 \frac{\text{кг ZnO}}{\text{кг сорбента} \cdot \text{с}} \quad (3)$$

Расход сероводорода, идущего на реакцию с оксидом цинка, в пересчете на 1 кг сорбента составляет

$$G_{h2s}^p = G_{zno}^p \cdot \frac{M_{h2s}}{M_{zno}} = 0,04 \cdot \frac{34}{81} = 4,72 \cdot 10^{-6} \frac{\text{кг H}_2\text{S}}{\text{кг сорбента} \cdot \text{с}} \quad (4)$$

где M_{ZnO} – молярная масса оксида цинка, кг/моль; M_{H_2S} – молярная масса сульфида цинка, кг/моль/

Расчет для окиси цинка проводился в интервале температур 250 – 950 °C со скоростью изменения температуры 20 К/мин. Нормальный расход однопроцентной смеси сероводорода в аргоне был принят равным 0,2 л/мин. Масса засыпки окиси цинка 16,9 мг. Диаметр частиц 50 мкм.

Моделирование поведения промышленного сорбента Katalco так же проходило при изменяющейся температуре в интервале 250 – 475 °C со скоростью 20 К/мин. В качестве навески брался шарик диаметром 3 мм массой 92 мг. Нормальный расход однопроцентной смеси сероводорода в аргоне был принят равным 0,2 л/мин. Температура газа на входе в реактор принималась 27 °C как для расчета конверсии окиси цинка, так и для расчета конверсии промышленного сорбента.

Численные исследования конверсии сорбента на основе оксида цинка марки ZnO₂SC проводились при постоянных температурах 300, 400, 500 и 600 °C. Диаметр частиц составлял 125 мкм. Масса навески не превышала 500 мг. Расход газа-имитатора равнялся 500 мл/мин с содержанием сероводорода в азоте 500 ppmv. В результате моделирования были получены 4 графика конверсии сорбента с течением времени (рис. 8).

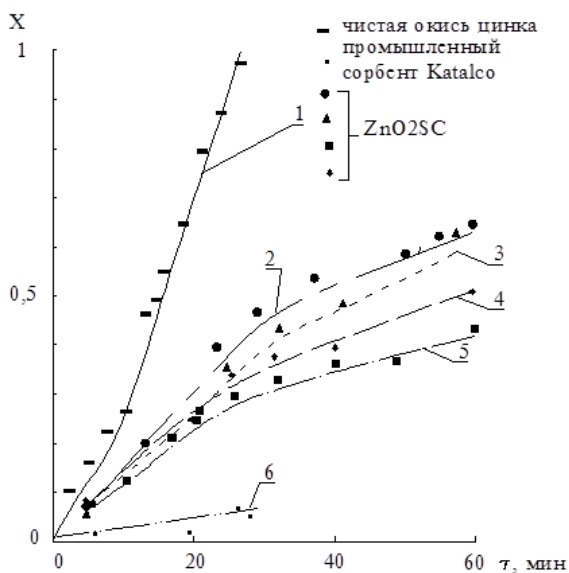


Рис. 8. Сравнение расчетной степени конверсии (точки) с экспериментом (линии) для чистой окиси цинка в интервале температур 250 – 950 °C (1), промышленного сорбента Katalco в интервале температур 250 – 475 °C (6) и сорбента ZnO_2SC по данным [2] для изотерм 600, 500, 400, 300 °C (кривые 2 – 5 соответственно)

В целом, расчетная модель показала свою работоспособность, как для динамических, так и для изотермических условий, для частиц разного диаметра и состава, для разных навесок 16 – 500 мг, что делает ее пригодной для дальнейших расчетов более сложных систем.

Исследование выполнено в Уральском федеральном университете за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-19-00524)

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. O. Levenshpiel. Chemical reactions engineering. New York: John Wiley&Sons. 1999.
2. Zhiwei Ma. Desulfurization kinetics of ZnO sorbent loaded on semi-coke support for hot coal gas / Zhiwei Ma, Xianrong Zheng, Liping Chang, Ruiyuan He, Weiren Bao // Journal of Natural Gas Chemistry, 21 (2012) 556–562.

Секция 4

Молодежь в энергетике



УДК 621.039

И. А. Таширева, С. Е. Щеклеин

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина,
г. Екатеринбург, Россия

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ И ВНЕДРЕНИЯ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ ЯДЕРНОЙ УСТАНОВКИ С МНОГОЦЕЛЕВЫМ РЕАКТОРОМ МБИР

В работе приводится описание перспективного исследовательского ядерного реактора МБИР, предназначенного для материаловедческих и ресурсных исследований материалов активной зоны с жидкометаллическим и газовым теплоносителем. Показаны отличия и преимущества ИЯУ МБИР по сравнению с существующими отечественными и зарубежными исследовательскими ядерными реакторами.

Ключевые слова: активная зона, теплоноситель, тепловыделяющая сборка (ТВС), тепловыделяющий элемент (ТВЭЛ), поглощающий элемент (ПЭЛ), ядерный топливный цикл, быстрые нейтроны, ядерное топливо.

I. A. Tashireva, S. E. Shcheklein

Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

THE PROSPECTS OF THE DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION OF THE RESEARCH NUCLEAR UNIT WITH A MULTIPURPOSE REACTOR MBIR

In this paper it is given a description of the prospective research reactor MBIR which is designed for the material science and resource research of the materials of the reactor core with liquid-metal and gas coolant. The differences and advantages of MBIR reactor in comparison with existing domestic and foreign research nuclear reactors are shown.

Key words: reactor core, coolant, fuel assembly, fuel element, absorber element, nuclear fuel cycle, fast neutrons, nuclear fuel.

ВВЕДЕНИЕ

Любые исследовательские реакторы выполняют три задачи:

- 1) облучение материалов и сборок для послереакторного исследования;
- 2) изучение поведения материалов сборок прямо в реакторе;
- 3) вывод нейтронного/нейтринного излучения в лабораторные установки вокруг.

Однако выбор конструкции реактора резко ограничивает круг исследования именно такой конструкцией. То есть нет возможности исследовать вопросы быстрых реакторов на установке с водяным охлаждением-замедлением. Или вопросы свинцовой коррозии в условиях облучения в натриевом реакторе. Или высокотемпературную стойкость материалов в реакторе с максимальной рабочей температурой 500 °C.

Решить эти вопросы может исследовательская ядерная установка (ИЯУ) с многоцелевым реактором МБИР (рис. 1 и 2). Через его активную зону проходят специальные каналы, в которые можно установить отдельную петлю со своим теплоносителем, своей ТВС, своей температурой. Таким образом, можно экспериментировать в одном реакторе с широким спектром концепций ядерных установок. Такой подход с модульными вставными петлями позволяет изучать и аварийные режимы, например, разрыв ТВЭЛов в петле или попадание воздуха в натрий.

ИЯУ МБИР

Концепция ИЯУ МБИР основывается на следующих положениях:

- МБИР проектируется, исходя из приоритета исследовательско-экспериментальных задач;
- ИЯУ МБИР размещается на площадке ОАО «ГНЦ НИИАР» - организации, обладающей непрерывным и многолетним опытом эксплуатации ИЯУ подобного типа, т.е. на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем, и всей необходимой инфраструктурой и персоналом для эксплуатации реактора;
- основополагающие технические решения, закладываемые в проект ИЯУ МБИР, отработаны и подтверждены практическим опытом использования в действующих или действовавших установках;
- при проектировании ИЯУ МБИР создание нового типа ядерного топлива не предусматривается, затраты на решение проблемы топливообеспечения должны быть минимизированы путём применения отработанных на других реакторах топливной матрицы и конструкции ТВЭЛа;
- при проектировании ИЯУ МБИР предусматривается возможность реализации наработки изотопной продукции, использования выведенных пучков нейтронов для проведения прикладных исследований; а также возможность утилизации выделяющейся тепловой энергии для целей теплофикации и электрогенерации с целью повышения эффективности использования МБИР;

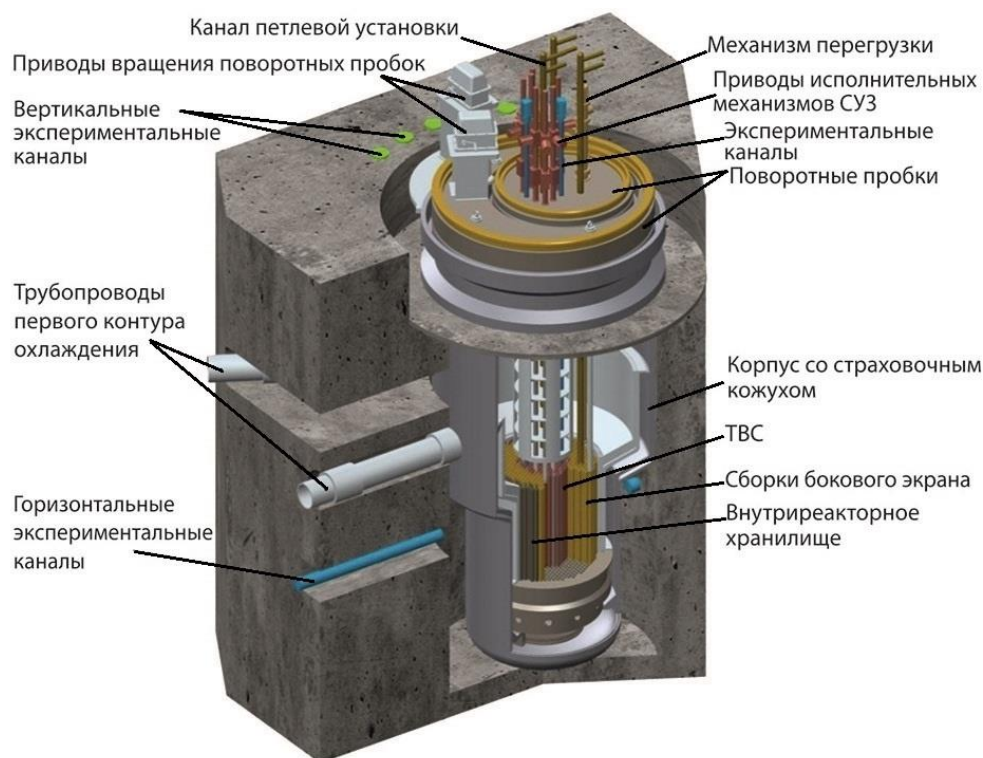


Рис. 1. Реакторная установка МБИР

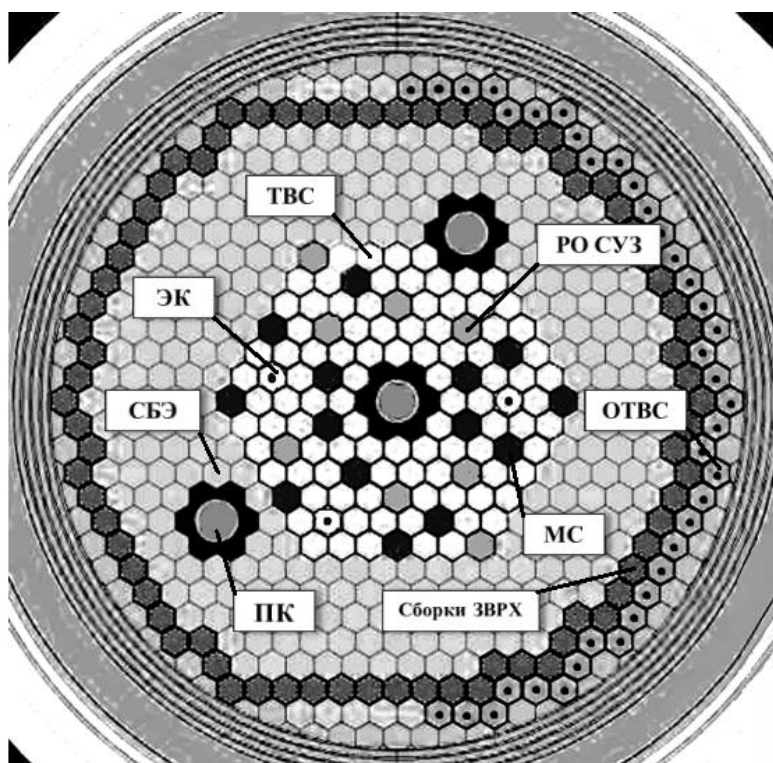


Рис. 2. Компоновка активной зоны реактора МБИР: ТВС – тепловыделяющая сборка, РО СУЗ – регулирующие органы системы управления и защиты, ЭК – экспериментальный канал (инструментированный), МС – материаловедческая сборка (экспериментальные ТВС), СБЭ – сборка бокового экрана (воспроизводство изотопов, экспериментальные ТВС), ОТВС – отработанные ТВС, ЗВРХ – внутриреакторное хранилище, ПК – петлевой канал

– в составе РУ МБИР предусматриваются автономные петлевые установки с различными типами теплоносителей, позволяющие осуществлять безопасное обращение как с элементами и устройствами активной зоны, так и с петлевыми каналами;

– при разработке режимов и условий эксплуатации МБИР исходят из приоритетности надежности.

ИЯУ МБИР должна быть ориентирована на решение следующих основных приоритетных задач:

- радиационные испытания перспективных конструкционных материалов для широкого класса ядерных реакторов, включая термоядерные установки в условиях интенсивного нейтронного излучения с плотность потока до $5,5 \times 10^{15} \text{с}^{-1}$;
- исследование перспективных видов ядерного топлива и поглощающих материалов, как для быстрых, так и тепловых реакторов;
- ресурсные испытания и отработка режимов эксплуатации ТВЭЛов, ТВС, ПЭЛов, других элементов активной зоны, разрабатываемых на базе новых конструктивных и технологических решений для инновационных реакторов следующего поколения с натриевым, тяжелометаллическим, газовым, жидкосолевым теплоносителями;
- исследование поведения ТВЭЛов и ТВС в переходных, циклических и аварийных режимах работы;
- исследование новых и модифицированных жидкотеплоносителей, средств их контроля и управления качеством;
- испытания и апробация новых типов оборудования различных технологических систем и стендов (элементы аварийного расхолаживания реакторов, парогенераторы, ловушки окислов, упаковки/пеналы, контейнеры и др./для транспортирования и хранения отработанного ядерного топлива и РАО); инновационных приборов и систем управления, контроля и диагностики реактора и т.д.;
- реакторные испытания и исследования проблем замкнутого топливного цикла, утилизации актинидов и выжигания долгоживущих продуктов деления;
- производство радиоизотопной продукции различного назначения, наработка модифицированных материалов;

– использование пучков нейтронов для медицинских целей.

ИЯУ МБИР позволит проводить исследования в разных областях (табл. 1).

Таблица 1

Области исследования ИЯУ МБИР	
№ п/п	Область
1	Физика реакторов
2	Безопасность
3	Материаловедение
4	Средства контроля и диагностики
5	Производство уникальных радиоизотопов
6	Испытания новых элементов активной зоны
7	Другое

Основные параметры и характеристики ИЯУ МБИР приведены в таблице 2.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследовательская ядерная установка с многоцелевым реактором МБИР станет самым мощным из действующих, сооружаемых и проектируемых исследовательских реакторов в мире. ИЯУ МБИР уникальна не только малочисленностью подобных установок, но идеологией и конструкцией. Технические характеристики МБИР позволят решать широкий спектр исследовательских задач в обоснование создания новых конкурентоспособных и безопасных ядерных энергетических установок, в том числе реакторов на быстрых нейтронах для замыкания ядерного топливного цикла.

Таблица 2

Основные параметры и характеристики ИЯУ МБИР

№ п/п	Параметр / характеристика	Значение
1	Тепловая мощность, МВт	150
2	Электрическая мощность, МВт	не менее 30 МВт
3	Мощность теплофикационной установки, МВт	не менее 30 МВт
4	Временной коэффициент использования реактора, %	65
5	Плотность потока нейтронов в АЗ, $1/\text{см}^2 \cdot \text{с}$	не менее $5 \cdot 10^{15}$
6	Схема теплоотвода	3х контурная 2х петлевая
7	Топливо	смешанное уран-плутониевое
8	ТВС	чехловая
9	ТВЭЛ	стерженьковый
10	Высота топливной части, мм	500
11	Теплоноситель 1 и 2 контура	Na
12	Теплоноситель 3 контура	вода/пар
13	Суммарный расход теплоносителя через реактор, кг/с	612,5
14	Температура теплоносителя: - на входе в реактор, °C - на выходе из реактора, °C	354 547
15	Давление в 1 контуре, МПа	не более 0,6
16	Число рабочих СУЗ	8
17	Принцип теплоотвода от активной зоны	Принудительная циркуляция при работе реактора на мощности. Обеспечение расхолаживания за счет естественной циркуляции на остановленном реакторе
18	Проектный срок службы, лет	до 50

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ямов В.Ю., Эркенов К.М., Валуев О.Н., Кутько В.В., Краснов В.В. Исследовательская ядерная установка с многоцелевым реактором на быстрых нейтронах (ИЯУ МБИР) // Техническое задание на разработку ИЯУ МБИР (ТЗ ИЯУ МБИР) / Книга 1. Общие положения и требования на разработку проекта «Строительство ИЯУ МБИР». ОАО «ГНЦ НИИАР», 2012. – 130 с.
2. Новый высокопроизводительный исследовательский реактор МБИР // Электронный ресурс URL: <http://tnenergy.livejournal.com/11041.html> / (дата обращения 29/09/2016).
3. Романова Н.В., Юхнов Б.М., Мамедов Т.С. Компонентные решения контуров теплоотвода РУ МБИР с натриевым теплоносителем / ОАО «НИКИЭТ», 2012. – 4 с.
4. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии: Правила ядерной безопасности исследовательских реакторов (НП-009-04), разработ. - НТЦ ЯРБ Госатомнадзора России, МИФИ, ФГУП ГНЦ - РФ ФЭИ, ФГУ РНЦ Курчатовский институт, Ростехнадзор, Росатом, ОНИ ПИЯФ им. Б.П. Константина, ФГУП ГНЦ РФ НИИАР, ФГУП НИКИЭТ, ФГУП НИИП, Москва, 2004 – 15 с.
5. Дементьев Б.А. Ядерные энергетические реакторы: Учебник для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Энергоатомиздат, 1990. – 352 с.: ил.
6. Маргулова Т.Х. Атомные электрические станции: Учебник для вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1984. – 304 с., ил.

УДК 621.039

*О. В. Лазаренко, С. Е. Щеклеин*УрФУ имени первого Президента России Б. Н. Ельцина,
г. Екатеринбург, Россия

ЭНЕРГОБЛОК С РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКОЙ БН-1200

В работе описан перспективный реактор четвертого поколения с натриевым теплоносителем БН-1200, приводятся его технические характеристики, а также основные параметры энергоблока.

Ключевые слова: энергоблок, ядерная энергетика, реактор-размножитель на быстрых нейтронах, топливный цикл, натриевый теплоноситель.

O. V. Lazarenko, S. E. Shcheklein

Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

A POWER GENERATING UNIT WITH FAST NEUTRON REACTOR BN-1200

A perspective sodium-cooled fast nuclear reactor of the fourth generation BN-1200 is described. The technical characteristics and general features of a power unit with BN-1200 are given in this work.

Key words: power generating unit, nuclear energy, fast breeder reactor, fuel cycle, sodium coolant.

ВВЕДЕНИЕ

Работы по созданию проекта перспективного реактора большой мощности начались ещё в 70-х годах параллельно с проектированием РУ БН-800. Цели проекта: создание типового серийного энергоблока повышенной безопасности, конкурентного по капитальных и эксплуатационных затрат, решение проблемы ОЯТ и отсутствие необходимости эвакуации и отселения при ЗПА. Существенное повышение интереса к необходимости развития реакторов на быстрых нейтронах с замкнутым топливным циклом было отмечено, начиная с 2004 г. Таким образом, предусматривается дальнейшее развитие быстрых реакторов в России в рамках создания новой технологической платформы ядерной энергетики с быстрыми реакторами четвертого поколения. В качестве быстрого реактора четвертого поколения с натриевым теплоносителем был выбран проект БН-1200.

ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ ТЗ НА РУ БН-120

Безопасность

- при любых авариях должна быть исключена необходимость эвакуации или отселения населения;
- максимальный запас реактивности при работе на номинальной мощности $\sim 0,5\% \Delta k/k$;
- суммарная вероятность тяжелых аварий с повреждением твэлов свыше максимального проектного предела не должна превышать 10^{-6} на реактор в год;
- в постулированной тяжелой аварии должно быть обеспечено удержание поврежденных элементов активной зоны в пределах корпуса реактора.

Надежность

- назначенный срок службы основного оборудования не менее 60 лет;
- конструкция оборудования должна обеспечивать проведение технического обслуживания и ремонта составных частей;

– конструкция оборудования должна обеспечивать непрерывную работу в установленных режимах эксплуатации в течение периода времени между перегрузками.

Экономичность

- КИУМ – не менее 0,9;
- удельная масса N_a не более 2,5 т/МВт(э);
- удельная металлоемкость РУ не более 6,0 т/МВт(э);
- назначенный срок службы – 60 лет.

Таблица 1

Технические параметры	
Тип реактора	На быстрых нейтронах
Теплоноситель	Натрий
Тепловая схема	Трехконтурная
Компоновка	Интегральная (баковая)
Топливо	МОХ-топливо, ^{235}U и ^{239}Pu
Турбина	К-1200-130/3000
Турбогенератор	ТЗВ-1200-2УЗ
Охлаждение тех. воды	Башенная испарительная градирня
Проектная схема	Моноблок (реактор-турбина)

Таблица 2

Основные параметры энергоблока с РУ БН-1200

Наименование параметра	Величина
Тепловая мощность, МВт	2800
Электрическая мощность, МВт	1220
Параметры теплоносителя 1 контура, °C	410/550
Параметры теплоносителя 2 контура, °C	355/527
Параметры острого пара (на выходе из ПГ) – давление, МПа – температура, °C	14,0 510
Тип промперегрева пара	Паровой
Температура питательной воды, °C	240
Расчетная температура охлаждающей воды, °C	20
Число часов использования установленной мощности, ч/год	7896
Срок службы основного оборудования, лет	60
Расход электроэнергии на собственные нужды, %	≤7,0
КПД АЭС (брутто), %	≥42,0
КПД АЭС (нетто), %	≥40,0

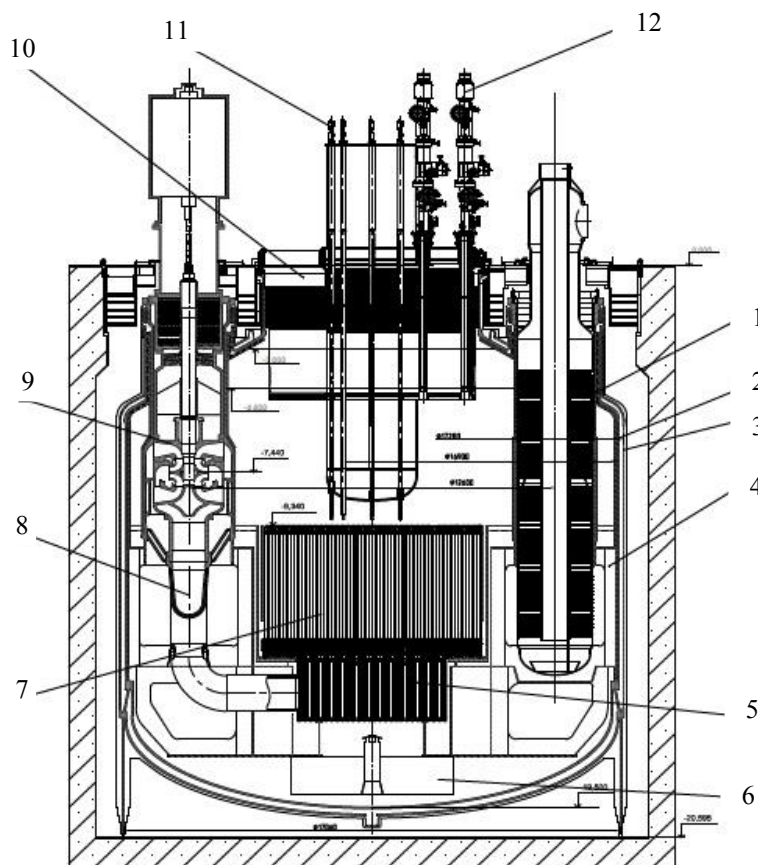


Рис. 1. Поперечный разрез реактора БН-1200:

1 – промежуточный теплообменник; 2 – основной корпус; 3 – страховочный корпус; 4 – опорный пояс; 5 – напорная камера; 6 – устройство сбора топлива; 7 – активная зона; 8 – напорный трубопровод; 9 – главный циркуляционный насос; 10 – поворотные пробки; 11 – исполнительные механизмы СУЗ; 12 – механизм перегрузки

УДК 621.039

Д. Ю. Балакин, С. Е. Щеклеин

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина,
г. Екатеринбург, Россия

РЕАКТОР «ПИК». КОНСТРУКЦИЯ И ХАРАКТЕРИСТИКИ

В работе описывается конструкция исследовательского реактора «ПИК» и приводятся его основные характеристики.

Ключевые слова: исследовательский реактор, конструкция, характеристики.

D. U. Balakin, S. E. Shcheklein

Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

PIK NUCLEAR REACTOR. THE CONSTRUCTION AND THE CHARACTERISTICS

This article is devoted to the construction and characteristics of PIK nuclear reactor.

Key words: research reactor, construction, characteristics.

ВВЕДЕНИЕ

Высокопоточный исследовательский реактор ПИК относится к установкам стационарного типа и предназначен для исследований в области физики конденсированного состояния, ядерной физики и физики слабого взаимодействия, структурной и радиационной биологии и биофизики, радиационной физики и химии, а также для решения многих прикладных технических задач. Большинство экспериментов на новом реакторе должно выполняться на выведенных нейтронных пучках. Востребованность в реакторах подобного класса растет в связи с расширением сферы применения нейтронного излучения в новых направлениях науки и техники, где могут использоваться методы рассеяния нейтронов.

КОНСТРУКЦИЯ

Реактор ПИК – водо-водяного типа, корпусной, под давлением, со стационарной плотностью потока нейтронов. Он имеет трехконтурную схему охлаждения. Генерируемое реактором тепло передается через градирни атмосфере.

Легководная активная зона объемом около 50 л помещена в тяжеловодный отражатель и представляет собой интенсивный источник быстрых нейтронов деления мощностью 100 МВт. Тяжеловодный отражатель, в котором замедляются быстрые нейтроны, обеспечивает наилучшее, по сравнению с другими замедлителями, отношение плотности потока тепловых нейтронов в экспериментальных каналах к мощности. Такой отражатель позволяет изменять и заменять экспериментальные каналы как до, так и после пуска реактора. В качестве теплоносителя, обладающего высокой удельной теплоемкостью, для охлаждения активной зоны использована обычная легкая вода (дистиллят).

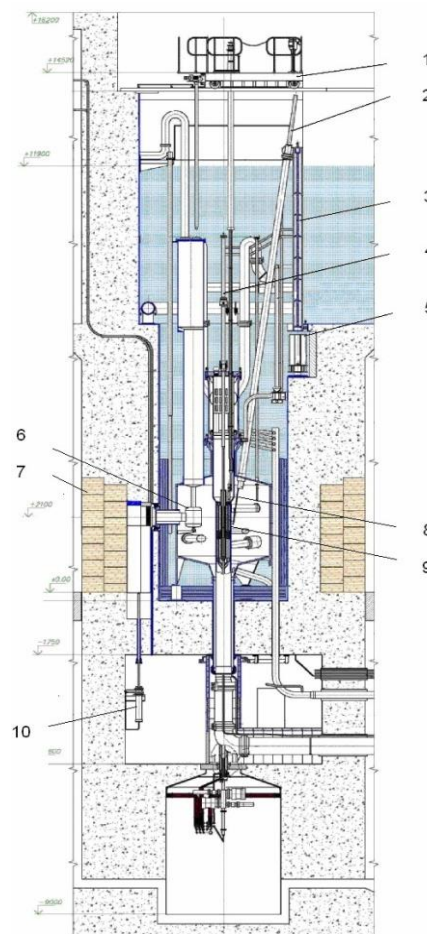


Рис. 1. Вертикальный разрез реактора ПИК: 1 – машина перегрузочная; 2 – привод стержня; 3 – гидрозатвор; 4 – ЦЭК; 5 – барабан перегрузочный; 6 – источник холодных нейтронов; 7 – защита разборная; 8 – поглощающий стержень; 9 – корпус с активной зоной; 10 – привод шибера ГЭК

Для получения высокой абсолютной плотности нейтронного потока твэлы должны позволять снимать высокую удельную мощность. Эти требования обеспечиваются высокой удельной загрузкой активной зоны ^{235}U 90% обогащения (в среднем 540 г/л) и развитием удельной теплопередающей поверхности.

Реактор «ПИК» обладает характеристиками, представленными в таблице 1.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Реактор ПИК отличается от большинства аналогичных зарубежных проектов увеличенными нейтронными потоками в отражателе за счет большей мощности, наличием нейтронной ловушки с очень высоким нейтронным потоком и возможностью облучения материалов в активной зоне. Предусмотрена модификация ТВС с полостью для облучения материалов.

Увеличенные нейтронные потоки позволят разместить достаточно большое количество разнообразных исследовательских стенов и получить максимально достоверные результаты исследований.

Реактор ПИК вполне может конкурировать с аналогичными проектами, и даже стать мировым центром по исследованиям с помощью нейтронного излучения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. М.В. Ковальчук, В.Л. Аксенов, К.А. Коноплев, А.Н. Ерыкалов, А.С. Захаров, В.М. Самсонов, С.Л. Смольский, Ю.Г. Драгунов, А.В. Лопаткин, И.Т. Третьяков, Р.П. Куатбеков. «Физический пуск реактора ПИК». Препринт ПИЯФ-2013, 2924, 28 с.

Таблица 1

Основные нейтронно-физические и технические характеристики реактора ПИК

Наименование	Значение
Тепловая мощность	100 МВт
Объем активной зоны	50 Л
Тип твэлов	Стержневой
Топливо	UO ₂ + Ве-бронза
Обогащение топлива	90%
Содержание U ²³⁵ в активной зоне	27,2 Кг
Количество ТВС в активной зоне	18 шт
Высота активной зоны	500 мм
Замедлитель/теплоноситель	Дистиллят Н ₂ О
Отражатель: боковой	D ₂ O
торцевой	H ₂ O
Максимальная плотность потока тепловых нейтронов в отражателе	$1,3 \cdot 10^{15}$ н/см ² ·с
Максимальная плотность потока тепловых нейтронов: в ловушке	$5 \cdot 10^{15}$ н/см ² ·с
Средняя по активной зоне глубина выгорания (в режиме частичной перегрузки)	20%
Предельная глубина выгорания топлива по ТВС в режиме частичной перегрузки	37%
Количество исполнит.органов СУЗ:	
– стержни КС	6 шт.
– стержни АЗ	2 шт.
– “шторки” с функциями АР, КС, АЗ	2 шт.
Кампания	≤30 сут
Расход воды I контура через активную зону	2400 м ³ /ч
Давление в I контуре	5,0 Мпа
Температура теплоносителя I контура:	
– на входе в активную зону,	50 °С
– на выходе из активной зоны	86 °С
Экспериментальные каналы:	
– горизонтальные (ГЭК)	10 шт.
– вертикальные (ВЭК)	6 шт.
– наклонные (НЭК)	6 шт.

УДК 517.4

М. М. Иванов, Л. Г. Гальперин, Е. Ю. Павлюк

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия

ЗАДАЧА ДИФФУЗИИ ОТ СФЕРИЧЕСКОЙ ЧАСТИЦЫ

В данной работе рассмотрен аппарат дробного дифференцирования, как один из методов решения задач диффузии от сферической частицы.

Ключевые слова: диффузия, дробное дифференцирование, моделирование процесса диффузии.

М. М. Ivanov, L. G. Galperin, E. Y. Pavluk

Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

THE PROBLEM OF THE DIFFUSION FROM A SPHERICAL PARTICLE

In this paper we consider the method of fractional differentiation, as a method of solving problems of the diffusion from a spherical particle.

Key words: diffusion, fractional differentiation, modeling of the diffusion process.

Математическое моделирование технологических процессов химико-термической обработки и взаимодействия дисперсных систем с внешней средой (восстановление частиц медного порошка, испарение капли влаги при впрыске полидисперсной смеси в проточную часть компрессоров и ГТУ, например) включает решение диффузионной задачи, цель которого установление связи между потенциалом переноса и величиной потока на границе частиц системы. Между тем, применение аппарата дробного дифференцирования [2] позволяет найти эту связь, минуя стадию решения задачи. Ниже рассматриваются подобные задачи с различными граничными условиями общего вида.

Постановка диффузионной задачи имеет вид:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_0 \cdot \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \cdot \frac{\partial C}{\partial r} \right) \quad (1)$$

$$C|_{t=0} = 0; C|_{r=R} = C_s(t); C|_{r \rightarrow \infty} = 0; R \leq r < \infty; t \geq 0 \quad (2)$$

На границе области ($r = R$) реализуется граничное условие I, II или III рода.

Точное аналитическое решение задачи существует лишь для стационарных граничных условий, громоздко и неудобно для практического применения, в частности, в расчетах динамики ряда технологических процессов в дисперсных средах. Упрощенные формы решения, приведенные в [1], получены за счет дополнительных ограничений общности. Между тем, простое по форме решение может быть найдено применением аппарата дробного дифференцирования [2].

Уравнение (1) представляется в операторной форме:

$$\left\{ \frac{\partial}{\partial t} - D_0 \left[\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial}{\partial r} \right] \right\} C(r, t) = \hat{L} C \quad (3)$$

Определение градиента концентрации и потенциала переноса C на поверхности сферы ($r = R$) можно осуществить путем операторного разложения, [2]

$$\hat{L} C = \left\{ \hat{L}_1 \cdot \hat{L}_2 \right\} C = \left\{ \frac{\partial^{1/2}}{\partial t^{1/2}} - \sqrt{D_0} \left[\frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r} \right] \right\} \cdot \left\{ \frac{\partial^{1/2}}{\partial t^{1/2}} + \sqrt{D_0} \left[\frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r} \right] \right\} C$$

Приравнявая нулю правый оператор $\hat{L}_2 C = 0$ при $r = R$ (т. к. правый оператор дает в дальнейшем решения, убывающие при $x \rightarrow \infty$, а левый – возрастающие, поэтому он должен быть исключен из рассмотрения [1]), получаем

$$q_s = -D_0 \frac{\partial C}{\partial r} \Big|_{r=R} = \sqrt{D_0} \left[\frac{\partial^{1/2}}{\partial t^{1/2}} + \frac{\sqrt{D_0}}{R} \right] C_s = \sqrt{D_0} \hat{L}_3 C_s \quad (4)$$

Согласно определению операции дробного дифференцирования [2], получим

$$q_s = \sqrt{D_0} \frac{1}{\Gamma(1/2)} \frac{d}{dt} \int_0^t C_s(\tau) \frac{d\tau}{\sqrt{t-\tau}} + \frac{D_0}{R} C_s(t) = \sqrt{\frac{D_0}{\pi}} \frac{d}{dt} \int_0^t C_s(\tau) \frac{d\tau}{\sqrt{t-\tau}} + \frac{D_0}{R} C_s(t) \quad (5)$$

C_s, q_s — концентрация и поток вещества на поверхности частицы соответственно.

В частном случае $C_s = C_0 = \text{Const}$, выражение (4) приобретает вид

$$q_s = \left\{ \sqrt{\frac{D_0}{\pi t}} + \frac{D_0}{R} \right\} C_0 \quad (6)$$

Для заданного потока q_s величина концентрации C_s на поверхности частицы определяется из (4) воздействием на обе части этого выражения оператором $\frac{\partial^{-1/2}}{\partial t^{-1/2}}$

$$\frac{\partial^{-1/2}}{\partial t^{-1/2}} q_s = \sqrt{D_0} \frac{\partial^{-1/2}}{\partial t^{-1/2}} \left[\frac{\partial^{1/2}}{\partial t^{1/2}} + \frac{\sqrt{D_0}}{R} \right] C_s = \sqrt{D_0} \left[1 + \frac{\sqrt{D_0}}{R} \frac{\partial^{-1/2}}{\partial t^{-1/2}} \right] C_s$$

Последнее выражение позволяет определить величину C_s из операторного равенства

$$C_s = \frac{1}{\sqrt{D_0}} \left[1 + \frac{\sqrt{D_0}}{R} \frac{\partial^{-1/2}}{\partial t^{-1/2}} \right]^{-1} \frac{\partial^{-1/2}}{\partial t^{-1/2}} q_s = \frac{1}{\sqrt{D_0}} \frac{\partial^{-1/2}}{\partial t^{-1/2}} \left[1 + \frac{\sqrt{D_0}}{R} \frac{\partial^{-1/2}}{\partial t^{-1/2}} \right]^{-1} q_s \quad (7)$$

Обратный оператор $\left[1 + \frac{\sqrt{D_0}}{R} \frac{\partial^{-1/2}}{\partial t^{-1/2}} \right]^{-1}$ можно представить в виде [2]

$$\left[1 + \frac{\sqrt{D_0}}{R} \frac{\partial^{-1/2}}{\partial t^{-1/2}} \right]^{-1} = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \left\{ \frac{\sqrt{D_0}}{R} \right\}^n \left\{ \frac{\partial^{-n/2}}{\partial t^{-n/2}} \right\} \quad (8)$$

Величина концентрации на поверхности частицы определится формулой (9)

$$C_s = \frac{1}{\sqrt{D_0}} \frac{\partial^{-1/2}}{\partial t^{-1/2}} \left\{ \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \left[\frac{\sqrt{D_0}}{R} \right]^n \frac{\partial^{-n/2}}{\partial t^{-n/2}} q_s(t) \right\} \quad (9)$$

Согласно [2] выражение, стоящее в скобках в (9), преобразуется к виду

$$\sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \left[\frac{\sqrt{D_0}}{R} \right]^n \frac{\partial^{-n/2}}{\partial t^{-n/2}} q_s(t) = \frac{d}{dt} \int_0^t q_s(\tau) \exp \left[\frac{D_0}{R^2} (t - \tau) \right] \operatorname{erfc} \left[\sqrt{\frac{D_0}{R^2} (t - \tau)} \right] d\tau \quad (10)$$

Концентрация диффундирующего вещества на поверхности частицы, таким образом, рассчитывается по выражению

$$C_s = \frac{1}{\sqrt{D_0}} \frac{\partial^{-1/2}}{\partial t^{-1/2}} \left\{ \frac{d}{dt} \int_0^t q_s(\tau) \exp \left[\frac{D_0}{R^2} (t - \tau) \right] \operatorname{erfc} \left[\sqrt{\frac{D_0}{R^2} (t - \tau)} \right] d\tau \right\} = \frac{1}{\sqrt{D_0}} \frac{\partial^{1/2}}{\partial t^{1/2}} \left\{ \int_0^t q_s(\tau) \exp \left[\frac{D_0}{R^2} (t - \tau) \right] \operatorname{erfc} \left[\sqrt{\frac{D_0}{R^2} (t - \tau)} \right] d\tau \right\} \quad (11)$$

В случае, если $q_s = q_0 = \text{Const}$

$$C_s = \frac{q_0}{\sqrt{D_0}} \frac{\partial^{1/2}}{\partial t^{1/2}} \left\{ \int_0^t \exp \left[\frac{D_0}{R^2} (t - \tau) \right] \operatorname{erfc} \left[\sqrt{\frac{D_0}{R^2} (t - \tau)} \right] d\tau \right\} \quad (12)$$

Величина интеграла [3] составляет

$$\int_0^t \exp \left[\frac{D_0}{R^2} (t - \tau) \right] \operatorname{erfc} \left[\sqrt{\frac{D_0}{R^2} (t - \tau)} \right] d\tau = \frac{R^2}{D_0} \exp \left[\frac{D_0}{R^2} t \right] \operatorname{erfc} \left[\sqrt{\frac{D_0}{R^2} t} \right] - \frac{R^2}{D_0} + \sqrt{\frac{4 R^2 t}{\pi D_0}} \quad (13)$$

Окончательно концентрация вещества на поверхности частицы при заданной плотности потока определяется из выражения

$$C_s = \frac{q_0 R^2}{D_0 \sqrt{D_0}} \frac{\partial^{1/2}}{\partial t^{1/2}} \left\{ \exp \left[\frac{D_0}{R^2} t \right] \operatorname{erfc} \left[\sqrt{\frac{D_0}{R^2} t} \right] - \frac{R^2}{D_0} + \sqrt{\frac{4 R^2 t}{\pi D_0}} \right\} = \frac{q_0 R^2}{D_0 \sqrt{\pi D_0}} \frac{d}{dt} \int_0^t \left\{ \exp \left[\frac{D_0}{R^2} \tau \right] \operatorname{erfc} \left[\sqrt{\frac{D_0}{R^2} \tau} \right] - 1 + \sqrt{\frac{4 D_0 \tau}{\pi R^2}} \right\} \frac{d\tau}{\sqrt{t - \tau}} \quad (14)$$

В случае граничных условий III рода

$$q_s = -D_0 \frac{\partial C}{\partial r} \Big|_{r=R} \neq [\varphi(t) - C|_{r=R}] \neq [\varphi(t) - C_s] \quad (15)$$

потенциал переноса на поверхности частицы находится из комбинации выражений (4) и (15);

$$\sqrt{D_0} \left[\frac{\partial^{1/2}}{\partial t^{1/2}} + \frac{\sqrt{D_0}}{R} \right] C_s = \beta [\varphi(t) - C_s] \quad (16)$$

Отсюда

$$\left\{ \beta + \sqrt{D_0} \left[\frac{\partial^{1/2}}{\partial t^{1/2}} + \frac{\sqrt{D_0}}{R} \right] \right\} C_s = \beta [\varphi(t) - C_s] \quad (17)$$

Поддействуем на обе части выражения (17) оператором $L^{-1} = \partial^{-1/2} / \partial t^{-1/2}$

$$\left[1 + \left(\frac{\beta}{\sqrt{D_0}} + \frac{\sqrt{D_0}}{R} \right) \frac{\partial^{-1/2}}{\partial t^{-1/2}} \right] C_s = \frac{\partial^{-1/2}}{\partial t^{-1/2}} \left\{ \frac{\beta}{\sqrt{D_0}} \varphi(t) \right\} \\ C_s = \left\{ \hat{L}_5 \right\}^{-1} \frac{\partial^{-1/2}}{\partial t^{-1/2}} \left\{ \frac{\beta}{\sqrt{D_0}} \varphi(t) \right\} = \frac{\partial^{-1/2}}{\partial t^{-1/2}} \left[1 + \left(\frac{\beta}{\sqrt{D_0}} + \frac{\sqrt{D_0}}{R} \right) \frac{\partial^{-1/2}}{\partial t^{-1/2}} \right]^{-1} \left\{ \frac{\beta}{\sqrt{D_0}} \varphi(t) \right\} \quad (18)$$

Преобразования, аналогичные представленным в (8 – 10), приводят к результату

$$C_s = \frac{\partial^{-1/2}}{\partial t^{-1/2}} \frac{d}{dt} \int_0^t \frac{\varphi(\tau)}{\sqrt{D_0}} \exp \left[\left(\frac{\beta}{\sqrt{D_0}} + \frac{\sqrt{D_0}}{R} \right)^2 (t - \tau) \right] \times \\ \times \operatorname{erfc} \left[\left(\frac{\beta}{\sqrt{D_0}} + \frac{\sqrt{D_0}}{R} \right) \sqrt{(t - \tau)} \right] d\tau = \frac{\partial^{1/2}}{\partial t^{1/2}} \int_0^t \frac{\varphi(\tau)}{\sqrt{D_0}} \exp \left[\left(\frac{\beta}{\sqrt{D_0}} + \frac{\sqrt{D_0}}{R} \right)^2 (t - \tau) \right] \times \\ \times \operatorname{erfc} \left[\left(\frac{\beta}{\sqrt{D_0}} + \frac{\sqrt{D_0}}{R} \right) \sqrt{(t - \tau)} \right] d\tau \quad (19)$$

Подстановка результата расчета потенциала переноса из выражения (19) в (5) позволит рассчитать поток на поверхности частицы.

Зависимости (5, 11, 19) приводятся к безразмерному виду. Выражение (5) в критериальной форме

$$Ki = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \frac{d}{dFo} \int_0^{Fo} \vartheta_s(x) \frac{dx}{\sqrt{Fo - x}} + \vartheta_s(Fo) \quad (20)$$

Для стационарных $\vartheta = \text{const}$ выражение (20) преобразуется к виду

$$\frac{Ki}{\vartheta} = 1 + \frac{1}{\sqrt{\pi Fo}} \quad (21)$$

Соответствующее представление выражения (11)

$$\vartheta_s = \frac{\partial^{1/2}}{\partial Fo^{1/2}} \left\{ \int_0^{Fo} Ki(x) \exp[Fo - x] \operatorname{erfc}[\sqrt{Fo - x}] dx \right\} \quad (22)$$

Аналогичным образом приводится к безразмерной форме выражение (19)

$$\vartheta_s = Bi \cdot \frac{\partial^{1/2}}{\partial Fo^{1/2}} \int_0^{Fo} \frac{\varphi(x)}{C_0} \exp[(Bi + 1)^2 (Fo - x)] \times \\ \times \operatorname{erfc}[(Bi + 1) \sqrt{(Fo - x)}] dx \quad (23)$$

Для дальнейшего расчета величины потока (числа Кирпичева Ki) можно воспользоваться выражением (20). В этих выражениях $Ki = q_s R / (D_0 \cdot C_0)$ – число

Кирпичева; $Bi = \beta \cdot R/D_0$ – число Био; $Fo = D_0 \cdot t/R_2$ – число Фурье; $\vartheta_s = C_s/C_0$ – безразмерная величина потенциала переноса на поверхности частицы; $x \equiv D_0 \cdot \tau/R_2$.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. А. В. Лыков. Теория теплопроводности. М., Высшая школа, 1967. – 600 с.

2. Ю. И. Бабенко. Метод дробного дифференцирования в прикладных задачах тепломассообмена. СПб. «Профессионал», 2009. – 584 с.

3. А. П. Прудников, Ю.А. Брычков, О.И. Мариничев. Интегралы и ряды. Специальные функции. М., Наука, 1983. – 752 с.

4. Е. Янке, Ф. Эмде, Ф. Леш. Специальные функции. М., Наука, 1968. – 344 с.

УДК 004.942

К. Н. Циглевкина, Д. О. Черных, О. Л. Ташлыков

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия

ВОЗМОЖНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ СБРОСНОЙ ТЕПЛОТЫ АЭС В ТЕПЛИЧНОМ ХОЗЯЙСТВЕ

Актуализирована проблема тепловых сбросов АЭС и ТЭС. Рассмотрена возможность создания энергобиологических комплексов, рассчитанных на утилизацию сбросной теплоты.

Ключевые слова: тепловые сбросы; низкопотенциальная теплота; утилизация сбросной теплоты; тепличное хозяйство.

K. N. Tsiglevkina, D. O. Chernyh, O. L. Tashlykov

Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

THE POSSIBILITY OF NUCLEAR POWER PLANT WASTE HEAT APPLYING IN THE GREENHOUSE FACILITIES

This article actualizes the problem of nuclear power plants and thermal power plants waste heat. The authors consider the possibility of creating of energetic biological complexes designed for waste heat recovery.

Keywords: waste heat; low-grade heat; waste heat recovery; greenhouse facility.

Известно, что КПД АЭС с реактором на тепловых нейтронах 30-35 %, а с реактором на быстрых нейтронах – свыше 40 %. Следовательно, более половины полученной в реакторе тепловой энергии выбрасывается в окружающую среду – идёт на нагрев водоёма-охладителя или, в случае использования градирен, атмосферы.

Основное препятствие для использования тепла, которое отводится охлаждающей водой, – его незначительный температурный потенциал. Однако существуют сферы народного хозяйства, где низкопотенциальную теплоту можно утилизировать эффективно. Seriously обсуждается проблема создания крупных комплексов, рассчитанных на максимальное использование тепловых сбросов. В этих комплексах «сбросное тепло» электростанций будет использоваться в тепличных хозяйствах, рыбководстве и т.п. Также тепловые сбросы АЭС можно использовать в решении задачи опреснения морской или подземной соленой воды [1].

Рост тарифов на тепловую и электрическую энергию увеличивает затраты на отопление, что приводит к уменьшению эффективности функционирования

тепличного хозяйства. Это предопределяет необходимость поиска альтернативных (более дешевых) источников энергии для данных целей. Согласно расчетам, АЭС за счет использования своих энергетических ресурсов могли бы в значительной степени обеспечить потребности в тепловой энергии крупных тепличных хозяйств [2, 3].

При использовании тепловых насосов можно обогревать значительные площади тепличных хозяйств. При этом произойдет понижение температуры технической воды при сбросе ее в водоем. На основании этого можно сделать вывод, что использование сбросной тепловой энергии на обогрев тепличных хозяйств, находящихся на небольших расстояниях от АЭС, позволит уменьшить расходы на обогрев и существенно снизить тепловые выбросы в окружающую среду (рис. 1).

Для обогрева теплиц и животноводческих помещений в зимний период целесообразно применять тепло с более высоким температурным потенциалом, которым обладает сбросная вода электростанций с искусственными охладителями-градирнями.

Сбросное тепло прямоточных и прямоточно-оборотных систем, имеющих более низкий температурный потенциал, лучше использовать для организации интенсивного рыбоводства в теплых водах, для нужд

иригации и орошения, а в ряде случаев – для обогрева почвы.

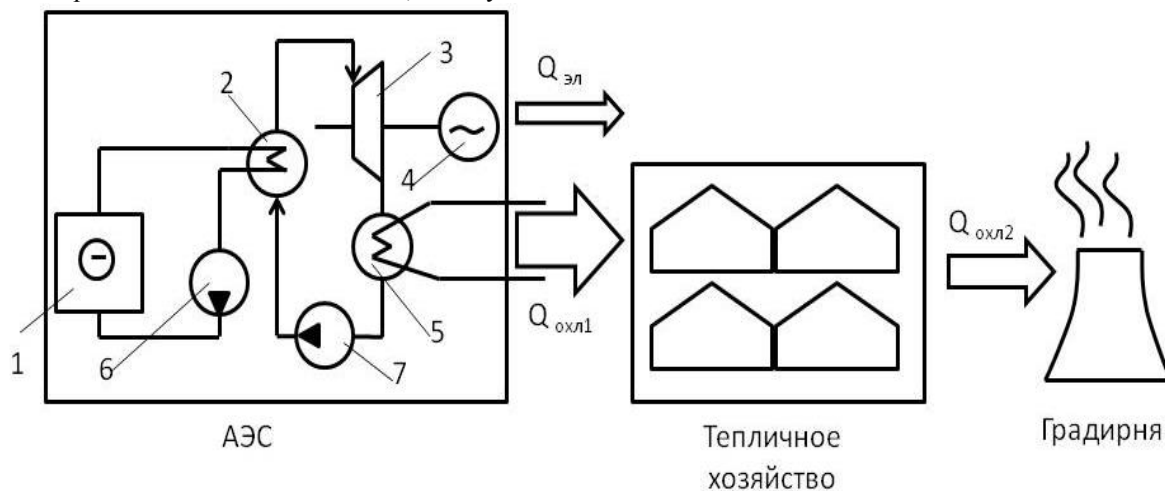


Рис. 1. Схема возможного использования сбросного тепла для тепличного хозяйства: (1 – реактор; 2 – парогенератор; 3 – турбина; 4 – электрогенератор; 5 – конденсатор; 6 – ГЦН; 7 – питательный насос)

Согласно СНиП 2.10.04-85, отопление теплиц и парников должно осуществляться за счет вторичных энергоресурсов, тепла геотермальных вод, при отсутствии указанных источников – от ТЭС, АЭС и ТЭЦ или собственных источников тепла [4].

Используя сбросное тепло, можно производить продукцию даже в районах с непригодным для сельского хозяйства климатом. В качестве примера следует привести Курскую АЭС, где 1995 году был введен в эксплуатацию крупный энергобиологический комплекс, имеющий следующие составляющие [3]:

1. Тепличное хозяйство площадью 500 м² и производительностью 10 т овощей в год. Система обогрева теплиц снижает в 4 раза потребление коммерческого тепла по сравнению с теплицами традиционного типа благодаря замещению высококалорийного тепла низкопотенциальным теплом сбросной воды. Объем низкопотенциального тепла в общем объеме потребляемого тепла для обогрева теплицы достигает 80 %. Расход низкопотенциального тепла 1 ГДж/ч.

2. Рыбохозяйственный промысел по производству 450 т живого карпа в год. Общий объем садков 6 тыс. м³ с площадью зеркала 4 тыс. м². Изменения температуры воды на входе и выходе зимой составляют 5-6 °С, летом – 8-10 °С.

3. Блок открытого грунта площадью 3,5 га с получением двух урожаев в год. Разница в температуре воды на входе и выходе составляет 10-12 °С с теплоотъемом 15-20 Вт/м².

Для расчета теплоты, необходимой для обогрева теплицы, используется формула [5]:

$$Q_{\text{сист.отоп}} = k_T (t_{\text{вн}} - t_{\text{нар}}) S_{\text{огр}} \text{ [Вт]}, \quad (1)$$

где k_T – коэффициент теплопроводности материала теплиц, Вт/(м²·К); $t_{\text{вн}}$ и $t_{\text{нар}}$ – температуры внутри и снаружи теплицы.

Площадь ограждений:

$$S_{\text{огр}} = k_{\text{огр}} S_{\text{общ}}, \quad (2)$$

где $k_{\text{огр}}$ – коэффициент ограждения; $S_{\text{общ}}$ – общая площадь теплиц.

Для расчета рассматривается период минимального прихода тепла извне, то есть экстремальные условия: ночной период, самые холодные сутки года.

При этом минимальная температура в теплице должна составлять 15 °С.

Таким образом, использование сбросной теплоты позволяет снизить тепловые сбросы в конденсаторе и более эффективно использовать топливо. При этом уменьшается тепловое загрязнение окружающей среды. Создание энергобиологических комплексов позволит превратить АЭС и ТЭС в круглогодичный источник ценных биопродуктов для населения и животноводства.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Васильев А.М. Развитие тепличных хозяйств при условии использования потенциала энергоснабжающих предприятий / А.М. Васильев // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. 2011. № 2.
2. Климов В.В. Расчет системы отопления культивационных сооружений [Электронный ресурс] URL: <http://greenhouses.ru/> (дата обращения 12.10.2015).
3. Ковшило В.Е. Методические указания по санитарному контролю за применением и эксплуатацией дистилляционных опреснительных установок, 1985 N 4045-85
4. Преобразование энергии биомассы [Электронный ресурс]. URL: <http://recyclers.ru/> (дата обращения 14.11.2015).
5. СНиП 2.10.04-85 Теплицы и парники: Строительные нормы и правила, 1986.

УДК 620.98

И. А. Шеломенцев, С. Е. Щеклеин

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина,
г. Екатеринбург, Россия

СТРАТЕГИЯ РАЗВИТИЯ АТОМНОЙ И ВОЗОБНОВЛЯЕМОЙ ЭНЕРГЕТИКИ ДО 2030 Г.

В работе представлен обзор стратегий и перспектив, представленных аналитиками и экспертами Международного энергетического агентства, а также специалистами из РФ.

Ключевые слова: энергетика; атомная энергетика; возобновляемая энергетика; распределённая энергетика; малая генерация.

I. A. Shelomentsev, S. E. Shcheklein

Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

DEVELOPMENT STRATEGY OF NUCLEAR AND RENEWABLE ENERGY TO 2030

The paper presents a review of development strategies from the analytics and experts of International Energy Agency and from Russian specialists.

Key words: energy; nuclear energy; renewable energy; diverse energy; small generation;

ВВЕДЕНИЕ

Российская атомная энергетика составляет 5 % от всего мирового рынка атомной электрогенерации, 15 % мирового рынка реакторостроения, 45 % мирового рынка обогащения урана, 15 % мирового рынка конверсии отработанного топлива и обеспечивает 8 % мировой добычи природного урана [1-2].

До 2030 г. планируется улучшить позиции страны на этих рынках, сохранив стабильные отношения с традиционными потребителями российских энергоресурсов и сформировав столь же устойчивые отношения на новых энергетических рынках. Действительно, рынок атомной энергетики огромен, как и её возможности: в 2009 году существующий парк АЭС суммарной мощностью 372 ГВт(э) произвёл 15 % выработанной суммарной электроэнергии [2].

Россия – мировой лидер в освоении технологий реакторов на быстрых нейтронах. Более 30 лет на БАЭС успешно работает опытно-промышленный быстрый реактор БН-600 с натриевым теплоносителем мощностью 600 МВт (э), введен в эксплуатацию БН-800 мощностью 880 МВт (э), начато строительство БН-1200 мощностью 1220 МВт (э). В стране также накоплен многолетний опыт эксплуатации реакторных установок со свинцово-висмутовым теплоносителем на атомной подводных лодках. На основе этого опыта сегодня разрабатывается проект быстрого реактора БРЕСТ-ОД-300.

Главными стратегическими ориентирами долгосрочной государственной энергетической политики являются [3, 4]:

- энергетическая безопасность;
- энергетическая эффективность экономики;

- бюджетная эффективность энергетики;
- экологическая безопасность энергетики.

МИРОВЫЕ ТЕНДЕНЦИИ

Общемировые тенденции предусматривают рост значения возобновляемых и местных источников энергии в обеспечении энергетических потребностей общества, в виду их низкого развития [4, 5]. Поставленные задачи будут решаться с использованием следующих мер и механизмов государственной энергетической политики:

- прямая государственная поддержка развития атомной энергетики и стимулирование развития угольной энергетики (технологий «чистого угля»);
- формирование долгосрочной политики развития возобновляемых источников энергии, учитывающей структуру и тенденции изменения прогнозного топливно-энергетического баланса;
- обеспечение равнодоходности поставок энергоносителей на внутренний рынок и на экспорт;
- реализация государственной политики в сфере повышения качества моторного топлива и глубины переработки нефти, рациональной государственной поддержки проектов глубокой переработки и обогащения угля, а также развития производства синтетического жидкого топлива на основе всех видов энергоресурсов (природный газ, уголь, биомасса и др.);
- повышение роли отчетных и прогнозных топливно-энергетических балансов как инструмента анализа и устранения диспропорций, эффективного управления развитием топливно-энергетического комплекса и его отраслей (без придания этим балансам директивного характера), включая переход на формирование отчетных и прогнозных топливно-

энергетических балансов в структуре, соответствующей международным стандартам;

– обеспечение эффективной межтопливной конкуренции взаимозаменяемых энергоносителей (газ, уголь).

Будут реализованы [4–6]:

- широкое развитие распределенной генерации;
- создание высокоинтегрированных интеллектуальных системообразующих и распределительных электрических сетей нового поколения в Единой энергетической системе России (интеллектуальные сети – Smart Grids);
- создание автоматизированных систем управления спросом на электроэнергию;
- создание комплекса высокоэффективного экологически чистого силового гидроэнергетического оборудования для приливных электростанций и средств их сооружения с помощью наплавных блоков;
- создание централизованной системы контроля безопасности напорных гидротехнических сооружений на гидрогенерирующих электростанциях и каскадов гидрогенерирующих электростанций на основе компьютерных систем диагностики гидротехнических сооружений;
- создание гибридной парогазовой установки;
- развитие технологий производства водорода (в том числе жидкого) из воды с использованием электроэнергии от атомных, тепловых электростанций и возобновляемых источников энергии;
- создание водородных систем аккумулирования энергии и покрытия неравномерностей графика нагрузки с коэффициентом рекуперации электроэнергии не менее 50 процентов для атомных электростанций, угольных тепловых электростанций и энергоустановок с использованием возобновляемых источников энергии;
- модернизация и обновление мощностей атомных электростанций с реакторами на тепловых нейтронах;
- создание экспериментальных и коммерческих атомных электростанций с реакторами на быстрых нейтронах;
- создание нового поколения водо-водяных энергетических реакторов со сверхкритическими параметрами пара и регулируемым спектром нейтронов;
- отработка вопросов эксплуатации и замыкания топливного цикла, разработка технологий и создание предприятий замыкания топливного цикла, обеспечивающих топливообеспечение атомных электростанций с учетом интегрального и годового потребления природного урана, объема разделительных работ, параметров воспроизводства топлива, удельной напряженности топлива в реакторах на быстрых нейтронах, а также вопросов безопасности;
- разработка инновационных технологий переработки отходов и замыкания ядерного цикла с приближением к радиационно-эквивалентному захоронению радиоактивных отходов;

– овладение энергией термоядерного синтеза на базе отечественных инновационных технологий и продуктивного международного сотрудничества, включая создание экспериментального термоядерного реактора (ИТЕР) и демонстрационной станции мощностью 1 ГВт;

– развитие технологий использования возобновляемых источников энергии, а также многофункциональных энергетических комплексов для автономного энергообеспечения потребителей в районах, не подключенных к сетям централизованного энергоснабжения;

– освоение эффективных технологий сетевого электро- и теплоснабжения на базе возобновляемых источников энергии; отработка технологий комбинированного использования возобновляемых источников энергии, а также технологий компенсации неравномерности выдачи мощности генерирующими объектами на основе энергии ветра и приливов;

– разработка и освоение технологий применения современных материалов при производстве оборудования и компонентов для генерирующих объектов на базе возобновляемых источников энергии с целью снижения стоимости их строительства и повышения эффективности функционирования; расширение производства и использования новых видов топлива, получаемых из различных видов биомассы;

– создание газотурбинных установок мощностью 300–350 МВт и на их основе высокоэффективных конденсационных парогазовых установок мощностью 500–1000 МВт, работающих на природном газе, с коэффициентом полезного действия выше 60 процентов;

– создание типовых модульных когенерационных парогазовых установок мощностью 100 и 170 МВт с коэффициентом полезного действия 53–55 % на теплоэлектроцентралях;

– создание экологически чистых угольных конденсационных энергоблоков на суперсверхкритические параметры пара с коэффициентом полезного действия 43–46 процентов мощностью 660–800 МВт;

– создание экологически чистых парогазовых установок мощностью 200–600 МВт с газификацией твердого топлива и с коэффициентом полезного действия 50–52 % и парогазовой установки на угольном синтез-газе;

– разработка, создание головных образцов и освоение энерготехнологических комплексов совместной выработки электроэнергии и синтетического жидкого топлива при работе на газообразном и твердом топливе;

– создание электрического транзита ультравысокого напряжения постоянного и переменного тока Сибирь – Урал – Европейская часть России;

– создание проводников с использованием новых композитных материалов, позволяющих увеличить токонесущую способность, уменьшить затраты на сооружение линий электропередачи, уменьшить потери в сетях;

– организация производства высокотемпературных сверхпроводниковых материалов и устройств на их основе; использование низкотемпературных сверх-

проводниковых индукционных накопителей электрической энергии для электрических сетей и гарантированного электроснабжения ответственных потребителей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. The role of nuclear power in the energy mix of tomorrow, Dr. Fatih Birol, Executive Director, International Energy Agency, World Nuclear Exhibition, Paris, 28 June 2016
2. World Outlook Energy 2015, International Energy Agency, 2015

3. Стратегия развития энергетики Российской Федерации до 2030, minenergo.gov.ru, 2008
4. Next Generation Wind and Solar Power. From cost to value, International Energy Agency, 2016
5. Technology Roadmaps Nuclear Energy 2015 Edition, International Energy Agency, 2015
6. Стратегия развития атомной энергетики России в первой половине XXI века. Основные положения. М., Минатом России, 2000

УДК 621.643

Исмаил Хоссейн

Университет Дакка, Бангладеш

Г. Е. Чиканцев, В. И. Велькин

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПАССИВНЫХ УСТРОЙСТВ УПРАВЛЕНИЯ ВИБРАЦИЯМИ ДЛЯ ТРУБОПРОВОДОВ С ДВУХФАЗНОЙ СРЕДОЙ

Целью данного исследования является анализ проблем вибрации силового оборудования. Возникновение колебаний вызывает серьезные проблемы в проектировании и эксплуатации энергоблоков атомной электростанции. Однако, полностью устранить колебания невозможно. Существует масса факторов, способствующих появлению колебаний. Одним из элементов, наиболее подверженных колебаниям, являются трубопроводы. Это крайне разветвленный и важный элемент на любой электростанции. Силы, вызванные завихрением потока, а так же наложение пульсаций давления на собственную частоту колебаний трубопровода оказывают серьезное влияние на трубопровод. Анализ результатов измерений и их статистическая обработка показали, что завихритель может стать эффективным пассивным устройством, снижающим уровень вибрации и позволяет снизить гидравлическое сопротивление для снижения виброперемещения в 1,3 ... 1,45 раза для трубопроводов с двухфазными средами.

Ключевые слова: вибрация трубопроводов; управление вибрацией; трубопровод с двухфазным теплоносителем.

Ismail Hossain

University of Dhaka, Bangladesh

G. E. Chikantsev, V. I. Velkin

Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

ANALYSIS OF THE EFFECTIVENESS OF PASSIVE CONTROL DEVICES FOR VIBRATION OF THE PIPELINES WITH TWO-PHASE COOLANT

The purpose of this study is to analyze the problems of vibration in power equipment. The occurrence of vibrations causes serious problems in operation and in the design of nuclear power plant units. However it is quite impossible to eliminate vibrations completely. This is due to the fact that there are many factors that contribute to their appearance. One of the major components that are mostly affected by vibrations is pipeline. In a nuclear power plants pipelines are one of the most extensive and important elements. Alternative forces caused by Vortex shedding make a severe impact on piping vibrations. Coincidence of pressure pulsations with structural frequency also causes piping vibrations. Analysis of the results of measurements and their statistical treatment showed that the insert-swirls are quite effective passive devices, allowing relatively low hydraulic resistance to reduce vibration level by 1.3 ... 1.45 times for two-phase flow pipelines.

Key words: piping vibrations; vibration control; two-phase flow pipelines.

INTRODUCTION

It is very usual that all piping with flow will vibrate to some degree. The most influencing potential sources for

steady-state vibration are pump induced pressure pulsations and flow turbulence. There exist distinct frequencies which are the multiples of the pump speed that

cause to occur pump induced pressure pulsations. Pulsations originate at the pump and travel throughout the entire discharge piping [1].

In case of Suction pumping, it is also possible to get induced pulsations especially with reciprocating pumps. When the pressure pulsations coincide with structural frequency of the piping there might appear distinct piping vibration. Nevertheless, other phenomena such as galloping, flutter, and buffeting are also encountered in practice. Galloping is another form of FIM (Flow Induced Motion) that noncircular cylinders undergo due to asymmetry or upstream turbulence [2]. There is another severe effect in unbalanced forces in pipe legs caused by pump-induced pressure pulsations. There occurs unbalanced force if the pressure on one elbow is not equal to the pressure on the other elbow.

THEORETICAL CONCEPTION

When a fluid such as air or water flows past a bluff body at certain velocities there takes place an oscillating flow called Vortex Shedding. In engineering design this phenomenon has major importance because the shedding of vortices also creates alternative forces, which occur more frequently as the velocity of the flow increases. If the vortex shedding frequency is near the structural vibration frequency of the body resonance can occur [3]. A dimensionless number called Strouhal number (S_r) is commonly used as a measure of the predominant shedding frequency (f_s). Strouhal number can be defined by the following way:

$$S_r = f_s L / U \quad (1)$$

where L is the characteristic length that is equal to the diameter D in case of a circular cylinder and U is the freestream velocity. Another dimensionless quantity called Reynolds number (Re) is used to predict similar flow patterns in different fluid flow situations. The Strouhal number can be defined as function of Reynolds number. The empirical Reynolds number formula can be stated as

$$S_r = 0.198 (1 - 19.7/Re). \quad (2)$$

CALCULATION

For analysis of hydrodynamic instability caused by turbulent motion the term "pressure pulsation" comes in a great importance. In other ways, at low Reynolds numbers the intensity of the pressure pulsation is about

$$P' = \rho \cdot (u)^2 \quad (3)$$

and for large values of Re

$$P' = 0.7 \rho \cdot (u)^2. \quad (4)$$

Based on the criteria of the Euler (E') depending on pressure pulsation amplitude and the Reynolds number can be stated as

$$E' = 2gH / U^2 \quad (5)$$

where H – the amplitude of the pressure pulsation and U – average speed.

For the value $E' = 0.04$ in the range of $8 \cdot 10^3 < Re < 10^8$, double amplitude coolant pressure oscillations in the

wall piping main circulation loops for $U = 10$ m/s ($Re = 10^7$), we obtain:

$$P' = 2 \cdot 10^{-2} \text{ kgf / cm}^2 = 2 \cdot 10^3 \text{ N / m}^2 \quad (6)$$

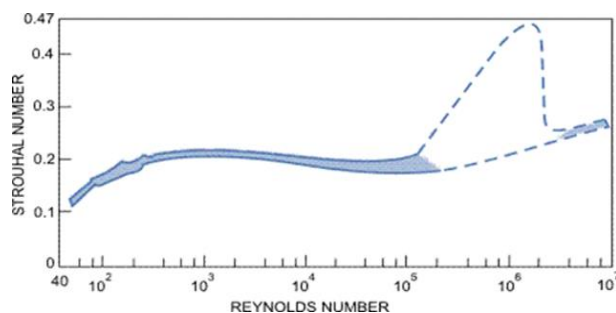


Fig. 1. Strouhal number versus Reynolds number for circular cylinders [2]

It is clearly known from the figure that the Strouhal number is about 0.2 over a large Reynolds number interval. At high Reynolds numbers the vortex shedding does not come out with distinct frequency but rather over a narrow band of frequencies. To modify the pump or to change the piping acoustical frequency there are some ways to eliminate the pulsations [4]. The addition of pulsation damper and suction stabilizer can help to change the piping acoustical properties.

RESEARCH SETTING

The swirl insert model has been created by the program 3DS MAX. This insert object is a three-dimensional body is constructed by forming a shell on the support sections placed along the predetermined path of arbitrary shape. This swirl insert model has been created on the basis of reference cross sections shown in Fig. 2.

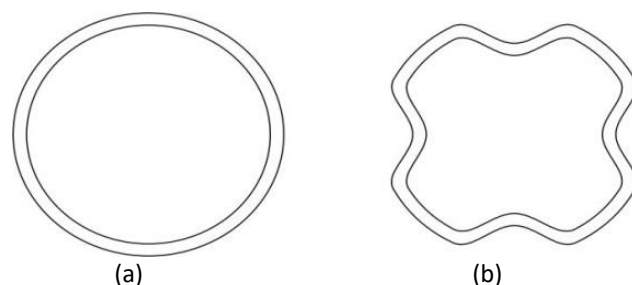


Fig. 2: Reference cross section for the swirl insert model: (a) standard pipe section, (b) modified pipe section

After placement of the resulting three-dimensional body on the support sections it is found by analogy with other types of inserts that, flow in the pipeline was swirled 180 degrees along the axis (Fig. 3).

However, in this form, the twirl has two major drawbacks:

1. Narrowing flux passing through the twirl, which could cause a significant increase in flow resistance.
2. Too strongly protruding interior swirl rolls that could cause water pulsation, would only increase the vibration.

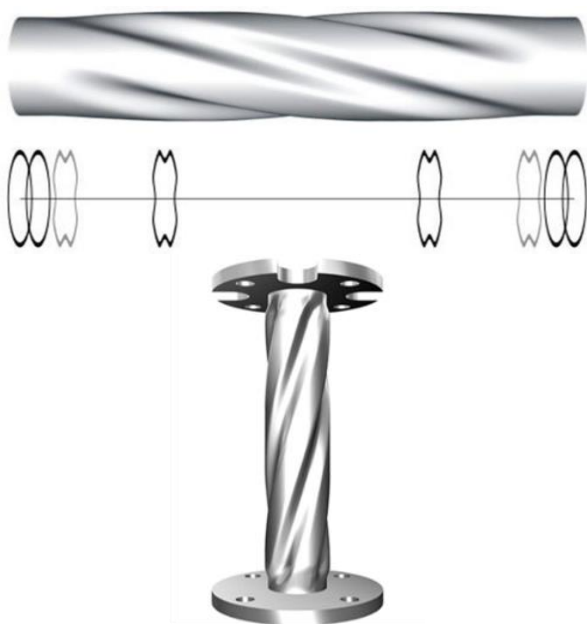


Fig. 3: Model of Swirl insert for reducing piping vibration

In general, all research activities can be divided into several stages within a given theme. Nuclear power plants (NPP) are designed, constructed, operated and inspected to prevent pipe ruptures. Despite of these preventive measures, plants are designed to mitigate the effects of hypothetical pipe ruptures, which therefore have to be postulated in any standard design process [5]. In the Ural State Technical University low-pressure stand has been designed and developed for the better research of pipeline vibrations. The basis for the development of the stand has served the needs of production with long sections of pipelines to reduce destructive action of vibrations occurring at different flow regimes of two-phase fluid [6]. The presented experimental set up is a closed pipeline areas in which oscillations occur most frequently.

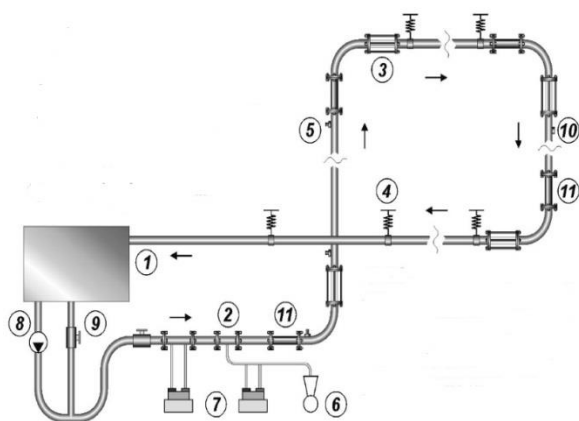


Fig. 4: The experimental setup 1 – tank; 2 – site mixing; 3 – node visualization; 4 – suspension; 5 – sensor vibration characteristics; 6 – compressor; 7 – measurement units costs; 8 – pump; 9 – valve; 10 – playground for sensor; 11 – insert-swirler

These sites are equipped with facilities to install vibration sensors. For visual monitoring of the flow structure of the stand, it is equipped with visualization nodes.

The main structural characteristics of the test pipeline:

- pipeline diameter – 44 mm;
- length of the vertical lifting section – 3090 mm;
- horizontal length of the plot is 3270 mm;
- length of the vertical standpipe section – 2060 mm;
- range of changes in water flow rate: 0-15 m³/h;
- range of flow : 0-15 m³/h;
- range of variation of void fraction: 0-94%.

Each of the stages is an important component part of a common goal for building up a mathematical model of optimal design of the swirl device to reduce pipe vibration. With the help of this model it will be possible to solve the whole complex of problems. For example, the choice of the insertion type, quantity grooves insertion length, and, in particular cases, the feasibility of all twirls are some of them.

Stages prior to the creation of a mathematical model:

1. The development and manufacturing of an experimental stand for studying the effect of two-phase flow in the vibration of the pipeline sections at various modes of coolant flow.
2. Development of various structures-swirl inserts designed for passive vibration reduction.
3. Study statistical pipeline vibration characteristics arising in different flow regimes of two-phase flow using inserts.
4. Development analog model for mapping pipeline vibration reduction process with two-phase flow based on the analysis of statistical data.
5. Creation of a mathematical model of the swirl device for reducing the vibration of the pipeline on the basis of an analog model.

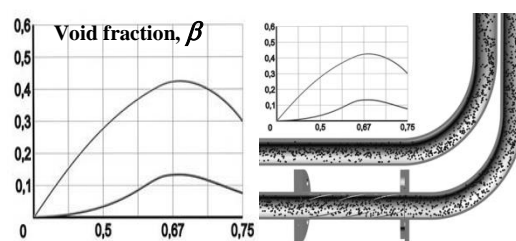


Fig. 5: 3DS Max analogue modeling testification by deployment of insert-swirler

One of the reasons of premature aging and failure of pipelines at power stations is having a sufficiently complex and random vibration. When the fluid flows at temperatures close to the saturation temperature in sufficiently long pipelines it is observed evaporation or rapid boiling, if pipeline contains local resistance. Currently, there are various ways to reduce vibration by practical implementation, one of which is installation of swirl devices [7]. They provide a winding stream, a partial separation of steam and water, which leads to the emergence of the regime, close to the ring. To investigate the effect of two-phase flow regimes in pipeline vibration several tests have been done. Initially, in the framework of the project respective vibration

acceleration values were determined, velocity and displacement of the pipeline at various flow regimes in the range Reynolds numbers $2000 < Re < 4000$ also were taken for investigation. The object of the next step was development of various experimental swirl-inserts designs intended for passive control (reduction) of vibrations and statistical study of pipeline vibrations occurring at different flow regimes of two-phase flow using inserts. The vibration level are reducing by 1.3...1,45 times for pipelines with two-phase flow.

CONCLUSION

Piping vibration is a very common problem in design engineering for pipelines. In this study we tried to find some reasons and its analytical solutions. By our 3DMax model and replacing swirl hose we can have an idea of reducing pressure pulsations. We have also observed how modifying filter associated piping the acoustic resonance can be reduced.

If high amplitude vibrations are recorded on main steam drain pots that are cantilevered from the main line, by adding tieback support the problem can be solved easily. When valves on small bore warm up lines are wide open they cause two phase flow mixing in the downstream header to the condenser results in cavitation induced vibration. If small bore valves on the warm up lines are throttled down to the near closed position vibration on the downstream header can be disappeared. Analysis of the results of measurements and their statistical treatment showed that the insert-swirls are quite

effective passive devices, allowing relatively low hydraulic resistance to reduce vibration level by 1.3...1,45 times for two-phase flow pipelines.

REFERENCES

1. Samarin A.A. Vibrations pipes of power plants and remedies. M. Energeia, P. 288 (1979)
2. The study of turbulent flows, two-phase media / V.E. Mamaev, G.E. Odisharia, O.V. Klapchuk et al. M. Nedra, P. 270 (1978).
3. Ganiev R.F., Kobasko N.I., Oscillatory phenomena in multiphase media, their use in the art. Kiev Technics, P. 143 (1980).
4. The study of turbulent flows, two-phase media / VE Mamaev, GE Odisharia, OV Klapchuk et al. M. Nedra, P. 270 (1978).
5. Andersen, A., Bergmann, H., Horstmann, R.. Protection against high-energy line breaks in WWR power plants. Nuclear Engineering and Design 206 (June(2-3)), (2001)119-212.
6. Shcheklein S.E., Velkin V.I., Petrov A.S., Nemihin I.Y. Stand for piping vibration studies with two-phase flow // Abstracts of the International Congress "Energy -3000", Obninsk, Obninsk Institute of Atomic Energy, (2002)
7. Shcheklein S.E., Velkin V.I. Experimental study of the effect of low-frequency oscillations of the liquid flow rate to the minimum reflux density at the film flow // Journal of Engineering Physics, (1987), T.55, 1, p.73-76.

УДК 621.039

Исмаил Хоссейн

Университет Дакка, Бангладеш

Мохаммад Шавкат Акбар

Комиссия по атомной энергии Бангладеш

*В. И. Велькин, С. Е. Щеклеин*Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина,
г. Екатеринбург, Россия

ОЦЕНКА СЕЙСМИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ВЫБОРЕ ПЛОЩАДКИ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬСТВА АЭС В БАНГЛАДЕШ

Бангладеш находится в активной тектонической зоне. По данным геологических исследований ясно, что Бангладеш и прилегающие территории под угрозой существенных землетрясений. Для густонаселенной страны последствия землетрясения могут быть катастрофическими. Это является основанием для тщательного анализа ситуации перед началом строительства атомных энергетических станций в соответствии с требованиями норм безопасности МАГАТЭ. Исследование раскрывает соотношение между сейсмическим ускорением и потенциальным ущербом. Кроме того, показаны вероятные последствия землетрясения на территории проектируемой АЭС и анализ пикового ускорения грунта.

Ключевые слова: параметры сейсмической опасности, МАГАТЭ, сейсмические ускорения и повреждения, максимальное ускорение грунта.

Ismail Hossain

University of Dhaka, Bangladesh

Mohammad Shawkat Akbar

Bangladesh Atomic Energy Comission

V. I. Velkin, S. E. Shcheklein

Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

SEISMIC SAFETY EVALUATION DURING SITE SELECTION FOR THE NUCLEAR POWER PLANTS IN BANGLADESH

This study will regard where our country stands when it comes to safety against earth quake. Bangladesh lies within an active tectonic framework. According to the previous geological studies it is clear that Bangladesh and its adjoining areas are mostly under threat of severe earth quake. The after effect of earthquake is more grievous in a densely populated country like ours. It is prerequisite to have an effective study on different requirements. This paper aims at the discussion of seismic sceneries in Bangladesh with analysis of seismic hazard parameters. Primarily, the previous records and impact of severe earth quake in and around Bangladesh have been signified. Later, the result of previous studies against this issue has been mentioned and compared with IAEA safety rules and regulations. Site selection is very important before nuclear power construction. Among various site specific parameters, the geotechnical parameters are identified as the critical parameters for designing nuclear power plant for a particular nuclear power project site. The investigation in this paper reveals the correlation between seismic acceleration versus potential damage. Besides, this paper shows the probable impact of earthquake magnitude on nuclear power project site and analysis of peak ground acceleration.

Key words: seismic hazard parameters, IAEA, seismic acceleration and potential damage, peak ground acceleration.

INTRODUCTION

Nuclear power has become an inevitable option for Bangladesh due to significant advantages of the technology with respect to environment protection, economic competitiveness and power supply stability. For implementation of nuclear power project, the issues of nuclear safety and security must be recognized as the top most concern for Bangladesh. The development of Bangla-

desh certainly depends on sustainable supply of electricity. Access to electricity is a constitutional right of the citizens of Bangladesh and ensuring the availability of electricity is the prime responsibility of the Government. This is why the Government of Bangladesh is planning to establish Nuclear power plants by the year of 2020. After the accidents of TMI and Chernobyl, intensive efforts were made to improve the safety features of the second and third generation of NPP. As Bangladesh is going to set up NPP for the first time it is very important

to have enough study according to the analysis of previous accidents. It is important to note that the reactors of Fukushima I nuclear power plant are the Boiling water reactors designed with comparatively rather small PGA values. As Bangladesh is a severe earthquake stimulated country it is very important to study earthquake parameters and have an analysis of previous earthquake results [1]. Accurate historical information on earthquakes is very necessary in evaluating the seismicity of Bangladesh in close coincidences with the geotectonic elements. Information on earthquakes in and around Bangladesh is available for several last years. Since the ground motion or vibration produced by earthquakes causes structural damage, Hence the knowledge of strong ground motion is important to assure the safety of the structure like NPP [2]. The planned nuclear power project site is situated 160 km north-west away from the capital city Dhaka. The proposed project site construction area is 260 acres and total site area is about 1060 acres. Planned site area is located in Ishwardi, Pabna on the eastern bank of Padma River. According to the Geological Survey of Bangladesh seismic zoning map the area is located in the zone II with probable PGA 0.05g.

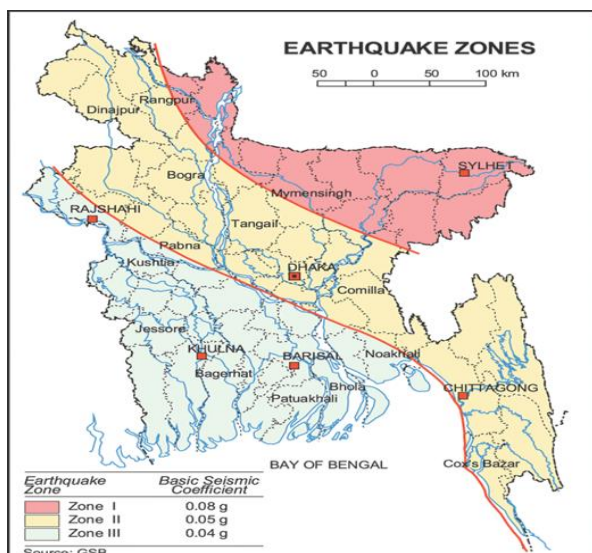


Fig. 1. The seismic zoning map of Bangladesh

PEAK GROUND ACCELERATION (PGA)

One of the important geophysical parameters is the Peak ground Acceleration (PGA). The PGA due to an earthquake could be measured by installing accelerograph at various locations on the ground. There is thumb rule relation between magnitude, intensity and ground acceleration which is known as Abridge Modified Mercury Intensity Scale. Several numerical approaches for determination of the PGA value have been established [3]. The

empirical Duggal's Equation is one of the best numerical tools to estimate the PGA values. In this study, the following Duggal's Equation has been used to determine the Earthquake magnitudes against the PGA values. The Duggal's Equation is as follows:

$$Y = 227.3 \cdot 10^{0.308M} (d+30)^{-1.201} \quad (1)$$

Where Y – PGA (in cm/sec²), d – Epicentral distance (in km) and M – earthquake magnitude (in Richter scale). We can calculate the reduced impact intensity of magnitude to the planned project site generated in any nearby Fault line. Equation relation between earthquake energy and earth quake magnitude is as follows:

$$\text{Log}_{10}E = 11.4 + 1.5M \quad (2)$$

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{r_2^2}{r_1^2} \quad (3)$$

Where r_1 – is depth of fault line and r_2 – is distance from epicenter to planned project site.

Shear wave velocity (V_s) are important physical properties of soils. They are used in both basic and applied geophysics and civil engineering. An important application of V_s is to predict amplification of ground shaking at soil sites. Isolation trenches have been widely applied for reduction of ground vibration [4]. This amplification is commonly termed as site response. Shear wave velocity is used both to classify the amplification potential of soil sites and to calibrate model of site specific predictions. The beginning of the incapability between probabilistic and deterministic seismic hazard assessment is that the methods differ radically in conception [5]. In our present study, we have determined the shear wave velocity at the nuclear power project site. The calculated share wave velocity response is shown in Figure 2.

The design of Nuclear Facilities other than NPPs (NFOP) was first addressed by the IAEA in 1985 with publication of a technical document (TEC-DOC348) "Earthquake resistant Design of Nuclear facilities with limited radioactive inventory [6]. It is important before planning to establish high valued project to maintain international regulations. If the aerial distance between Madhupur fault and planned project site is 116 km. We can calculate the impact of intensity magnitude in the planned project area for the corresponding value of origin point. The estimated values are represented in the following table 2.

Table 1

Different Fault parameters in Bangladesh

Fault	Mw	Depth to top of Fault(km)	Length (km)	Dip (degree)	Down-dip Rupture width(km)	Fault Type
Madhupur	7.5	10	60	45	42	Reverse
Dauki Fault	8.0	3	233	60	43	Reverse
Plate boundary -1	8.5	3	795	20	377	Reverse
Plate boundary-2	8.0	3	270	30	137	Reverse

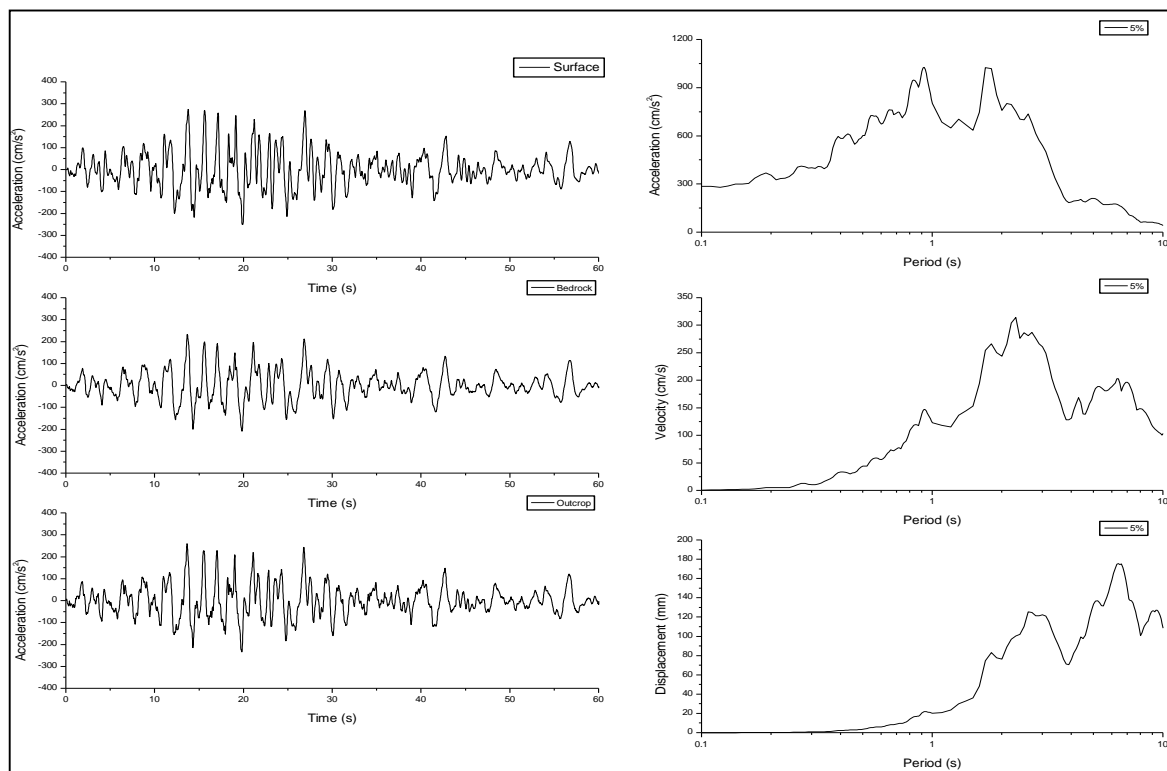


Fig. 2. The calculated share wave response pattern

Table 2
Madhupur Fault (M) & Planned Project site (M)

Madhupur Fault (M)	Rooppur Site (M)
9	7.6
8.5	7.1
8	6.6
7.5	6.1
7	5.6

Seismic hazard assessment for a given site is founded on two pillars: firstly, a seismic –source model quantitatively describing all possible earthquakes in the vicinity (generally within about 300km) and secondly, a ground –motion model expressing the shaking that would happen at the site given the occurrence of each of these earthquakes [7].

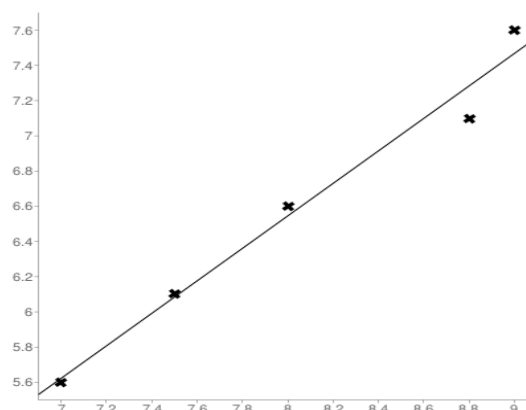


Fig. 3. Madhupur Magnitude Vs Planned project site Magnitude

Table 3
Calculated values of PGA (g) Vs earthquake magnitude

SI NO	Earthquake Magnitude	PGA(g)	SI NO	Earthquake Magnitude	PGA(g)
1	9.68	2.5	14	8.64	1.2
2	9.62	2.4	15	8.52	1.1
3	9.56	2.3	16	8.38	1
4	9.5	2.2	17	8.24	0.9
5	9.43	2.1	18	8.07	0.8
6	9.36	2	19	7.88	0.7
7	9.29	1.9	20	7.66	0.6
8	9.21	1.8	21	7.41	0.5
9	9.13	1.7	22	7.09	0.4
10	9.05	1.6	23	6.69	0.3
11	8.96	1.5	24	6.11	0.2
12	8.86	1.4	25	6.0	0.18
13	8.75	1.3			

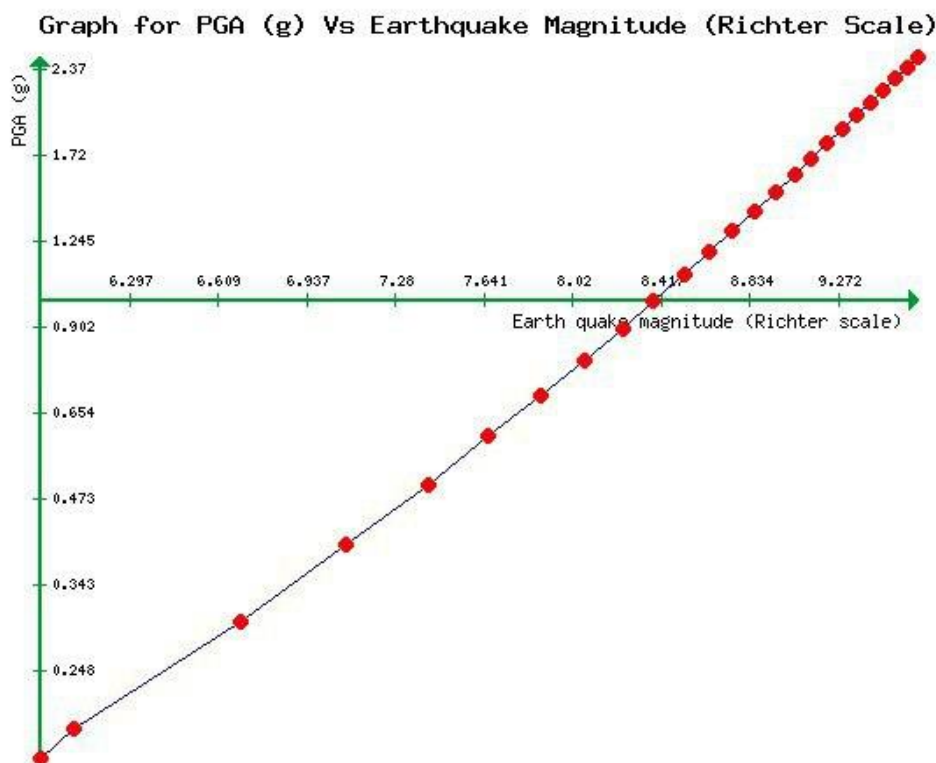


Fig. 4. Graph for PGA (g) Vs Earthquake Magnitude (Richter Scale)

Earthquakes from surrounding regions have to be assumed to occur at the border of their seismo tectonic region and their impacts on the site must be estimated [8]. It is important to note that NPP designs include consideration of natural events those are region, area and site specific and the catastrophic nature of earthquake depends on tectonic and geological fault line locations. Two accepted methods are available for assigning earthquake ground motions [9]. Based on available geological and geotechnical characteristics the subsoil investigations and site specific seismic hazard assessment are the vital areas of investigation for selection of a NPP site in Bangladesh [10].

CONCLUSION

From the seismic hazard analysis and subsoil investigation it is clear that any heavy structures like NPP with larger design basis PGA values about 0.2g-2.5g, if it is built at planned project site could withstand a 7.5-9.0 magnitude earthquake larger than the strongest expected to hit the area in the future. If aerial distance between Madhupur and planned project site is 116 km, the estimated PGA value in project site would be 482.18 cm/sec^2 (0.49g). Thus, it can be concluded on the basis of estimated PGA value that the maximum earthquake magnitude in Project site be 8.1M.

REFERENCES

1. Dr. Mohammad Shawkat Akbar, 11 February, 2011, A Holistic approach for establishing Nuclear Power infrastructure in Bangladesh, BAEC.
2. Anbazhagan P, Smith C.V, Abishek kumar, Deepu chandran, February 2013, Estimation of design basis earthquake using region specific Mmax for the NPP site at kalpakkam, Tamil nadu, India, Nuclear Engineering and design 259(2013)41-64.
3. Md. S. Bari, T. Das, 15 march, 2014, A comparative study on seismic analysis of Bangladesh National Building Code (BNBC) with other Building codes.
4. FengLin , Hongkuiji., October 2015, NPP Planning based on analysis of ground vibration caused by collapse of large scale cooling towers, Nuclear Engineering 295(2015)27-39.
5. Ellis L. Kriitzsky, 2002, How to combine deterministic and probabilistic methods for assessing earthquake hazards, Engineering Geology 70(2003) 157-163.
6. Paolo Contri, Aybars Gurbinar, Pierre Labbe, January 2004, Design of nuclear facilities other than NPPs in relation to external events, Nuclear Engineering and Design 229 (2004) 247-263.
7. John Douglas, Benjamin Edwards, July 2016, Recent and future developments in earthquake ground motion estimation, Earth science reviews 160 (2016) 203-219.
8. Gunter leydecker, Timo Schmitt., October 2007, Seismo- engineering parameters for sites of interim storages for spent nuclear fuel at German nuclear power plants, Soil Dynamics and Earthquake engineering 28(2008) 754-762.
9. Ellis L. Krinitzsky, 2002, How to obtain earthquake ground motions for engineering design, Engineering Geology 65(2002)1-16.
10. Ismail Hossain, Dr. Mohammad Shawkat Akbar, Md. Azizur Rahman, May, 2014, Print. Thesis- Nuclear power plant pre design documentation: seismic and flooding hazard evaluation (Dhaka University Library)

ОБ АВТОРАХ

Абаимов Николай Анатольевич ассистент кафедры «Тепловые электрические станции» ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина», Россия, Екатеринбург	Abaimov, Nikolai A. Assiatant Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, Russia, Ekaterinburg
Арбузова Елена Валерьевна старший преподаватель кафедры «Атомные станции и возобновляемые источники энергии», ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина», Россия, Екатеринбург mureva82@mail.ru	Arbuzova, Elena V. Senior lecturer Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, Russia, Ekaterinburg
Балакин Денис Юрьевич студент кафедры «Атомные станции и возобновляемые источники энергии», ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина», Россия, Екатеринбург balakin.serbishino@mail.ru	Balakin, Denis Y. Student Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, Russia, Ekaterinburg
Балдин Виктор Юрьевич доцент кафедры «Тепловые электрические станции», ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина», Россия, Екатеринбург v.u.baldin@urfu.ru	Baldin, Victor Yu. Assistant professor Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, Russia, Ekaterinburg
Бегалов Владимир Анатольевич канд. техн. наук, доцент каф. «Атомные станции и возобновляемые источники энергии», ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина», Россия, Екатеринбург v.a.begalov@urfu.ru	Begalov, Vladimir A. Assistant professor Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, Russia, Ekaterinburg
Безбородов Кирилл Алексеевич магистрант кафедры «Теплоэнергетика и теплотехника», ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина», Россия, Екатеринбург bez-be@mail.ru	Bezborodov, Kirill A. Master student Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, Russia, Ekaterinburg
Бельтюков Александр Иванович канд. техн. наук, доцент каф. «Атомные станции и возобновляемые источники энергии», ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина», Россия, Екатеринбург beltukovai@gmail.ru	Beltukov, Aleksandr I. Assistant professor Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, Russia, Ekaterinburg
Борисов Андрей Юрьевич магистрант кафедры «Электротехника и электротехнологические системы», ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина», Россия, Екатеринбург boris772@mail.ru	Borisov, Andrey Y. Master student Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, Russia, Ekaterinburg
Велькин Владимир Иванович канд. техн. наук, доцент каф. «Атомные станции и возобновляемые источники энергии», ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина», Россия, Екатеринбург v.i.velkin@urfu.ru	Velkin, Vladimir I. Assistant professor Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, Russia, Ekaterinburg

Гальперин Леонид Гдальевич д-р техн. наук, профессор кафедры «Теплоэнергетика и теплотехника», ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина», Россия, Екатеринбург lhalp@k66.ru	Galperin, Leonid G. Professor Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, Russia, Ekaterinburg
Гильметдинова Юлия Радиковна магистрант кафедры «Тепловые электрические станции», ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина», Россия, Екатеринбург y.gilmetdinova@mail.ru	Gilmutdinova, Julia R. Master student Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, Russia, Ekaterinburg
Глухов Сергей Александрович студент кафедры «Атомные станции и возобновляемые источники энергии», ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина», Россия, Екатеринбург arane12231@gmail.com	Glukhov, Sergey A. Student Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, Russia, Ekaterinburg
Говоров Петр Петрович канд. техн. наук, начальник отдела, Филиал ОАО «Концерн Росэнергоатом» Белоярская атомная электростанция, Россия, Заречный ompr@belnpp.ru	Govorov, Petr P. Head of department Rosenergoatom, Beloyarskaya NPP, Russia, Zarechny
Голдобин Юрий Матвеевич доктор техн. наук, профессор кафедры «Теплоэнергетика и теплотехника», ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина», Россия, Екатеринбург	Goldobin, Yuriy M. Professor Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, Russia, Ekaterinburg
Денисов Константин Сергеевич магистрант кафедры «Атомные станции и возобновляемые источники энергии», ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина», Россия, Екатеринбург denser93@mail.ru	Denisov, Konstantin S. Master student Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, Russia, Ekaterinburg
Долгий Юрий Филиппович профессор кафедры «Теоретическая механика», ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина», Россия, Екатеринбург Jury.Dolgy@urfu.ru	Dolgiy, Jury F. Professor Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, Russia, Ekaterinburg
Дубовой Григорий Юрьевич инженер-физик, Филиал ОАО «Концерн Росэнергоатом» Белоярская атомная электростанция, Россия, Заречный dubovoy12@gmail.com	Dubovoy, Grigorii Yu. Engineer Rosenergoatom, Beloyarskaya NPP, Russia, Zarechny
Иванов Максим Михайлович магистрант кафедры «Теплоэнергетика и теплотехника» ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина», Россия, Екатеринбург Maxonman@bk.ru	Ivanov, Maxim M. Master student Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, Russia, Ekaterinburg
Иошин Алексей Александрович научный сотрудни, НПП «ЭКСОРБ», Россия, Екатеринбург sorb@bk.ru	Ioshin, Alexey A. Scientist Scientific Production Enterprise EKSORB, Russia, Ekaterinburg

Каграманов Юрий Александрович Аспирант, ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина», Россия, Екатеринбург kagramanovya@yandex.ru	Kagramanov, Yuri A. Post-graduate student Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, Russia, Ekaterinburg
Карпенко Анатолий Иванович д-р техн. наук, профессор кафедры «Атомные станции и возобновляемые источники энергии», ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина», Россия, Екатеринбург aikarp@mail.ru	Karpenko, Anatoliy I. Professor Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, Russia, Ekaterinburg
Климова Виктория Андреевна старший преподаватель кафедры «Атомные станции и возобновляемые источники энергии», ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина», Россия, Екатеринбург v.a.klimova@mail.ru	Klimova, Viktoriia A. Senior lecturer Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, Russia, Ekaterinburg
Козлов Андрей Владиславович ведущий инженер-физик, АО «Институт реакторных материалов», Россия, Заречный t53031@mail.ru	Kozlov, Andrey V. Head Engineer JSC «Institute of Nuclear Materials», Russia, Zarechny
Колпаков Александр Сергеевич д-р техн. наук, профессор, ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина», Россия, Екатеринбург a.s.kolpakov@urfu.ru	Kolpakov, Alexander S. Professor Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, Russia, Ekaterinburg
Кропачев Юрий Анатольевич ведущий инженер, Филиал ОАО «Концерн Росэнергоатом» Белоярская атомная электростанция, Россия, Заречный anatolevich66@yandex.ru	Kropachev, Yuri A. Head Engineer Rosenergoatom, Beloyarskaya NPP, Russia, Zarechny
Кузнецов Игорь Викторович председатель совета некоммерческого партнерства «Развитие системы печей Кузнецова», Россия, Екатеринбург igor@stove.ru	Kuznetsov, Igor V. Head, Noncommercial partnership “The Development of stove systems of Kuznetsov”
Кузнецов Прохор Сергеевич магистрант, ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина», Россия, Екатеринбург Prohor555@List.ru	Kuznetsov, Prokhor S. Master student Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, Russia, Ekaterinburg
Кузнецов Сергей Борисович руководитель Департамента по обращению с РАО АЭС АО «ВНИИАЭС», Россия, Москва kuznetsovsb@vniiaes.ru	Kuznetsov, Sergey B. Department head JSC VNIIAES, Russia, Moscow
Лабинцев Егор Сергеевич студент, ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина», Россия, Екатеринбург egor.labintcev@mail.ru	Labintcev, Egor S. Student Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, Russia, Ekaterinburg

Лазаренко Оксана Васильевна студент кафедры «Атомные станции и возобновляемые источники энергии», ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина», Россия, Екатеринбург oxanalazar@gmail.com	Lazarenko, OXana V. Student Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, Russia, Ekaterinburg
Лим Ксения Владимировна студент кафедры «Атомные станции и возобновляемые источники энергии», ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина», Россия, Екатеринбург kseniyastarcowa@mail.ru	Lim, Ksenia V. Student Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, Russia, Ekaterinburg
Лойко Арнольд Эрлихович канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры «Техническая физика», ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина», Россия, Екатеринбург	Loyko, Arnold E. Assistant professor Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, Russia, Ekaterinburg
Лукьяненко Вера Юрьевна студент кафедры «Атомные станции и возобновляемые источники энергии», ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина», Россия, Екатеринбург vera-lukyanenko@mail.ru	Lukyanenko, Vera Yu. Student Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, Russia, Ekaterinburg
Лямбель Анастасия Николаевна учебный мастер кафедры «Атомные станции и возобновляемые источники энергии», ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина», Россия, Екатеринбург a.n.liambel@urfu.ru	Lyambel, Anastasia N. Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, Russia, Ekaterinburg
Лях Лев Евгеньевич студент кафедры «Атомные станции и возобновляемые источники энергии», ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина», Россия, Екатеринбург l-lyakh@bk.ru	Lyakh, Lev E. Student Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, Russia, Ekaterinburg
Маринкова Екатерина Игоревна магистрант кафедры «Электротехника и электротехнологические системы», ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина», Россия, Екатеринбург kate563@mail.ru	Marinkova, Ekaterina I. Student Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, Russia, Ekaterinburg
Марчкова Юлия Александровна студент кафедры «Тепловые электрические станции», ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина», Россия, Екатеринбург yuliamarchkova@mail.ru	Marchkova, Yuliya A. Student Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, Russia, Ekaterinburg
Матвеев Андрей Валентинович канд. техн. наук, доцент кафедры «Атомные станции и возобновляемые источники энергии», ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина», Россия, Екатеринбург a.v.matveev@urfu.ru	Matveev, Andrey V. Assistant professor Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, Russia, Ekaterinburg

Мерзлякова Екатерина Алексеевна студент кафедры «Атомные станции и возобновляемые источники энергии», ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина», Россия, Екатеринбург katyapp14@yandex.ru	Merzlyakova, Ekaterina A. Student Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, Russia, Ekaterinburg
Микула Владимир Анатольевич доцент кафедры «Тепловые электрические станции» ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина», Россия, Екатеринбург mikoula@yandex.ru	Mikula, Vladimir A. Assistant professor Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, Russia, Ekaterinburg
Микула Екатерина Владимировна магистрант кафедры «Теплогазоснабжение и вентиляция», ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина», Россия, Екатеринбург mikoula@yandex.ru	Mikula, Catherine V. Master student Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, Russia, Ekaterinburg
Михайлова Алина Федоровна студент кафедры «Атомные станции и возобновляемые источники энергии», ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина», Россия, Екатеринбург tuzik.snz@gmail.com	Mikhailova, Alina F. Student Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, Russia, Ekaterinburg
Немихин Юрий Евгеньевич старший преподаватель кафедры «Атомные станции и возобновляемые источники энергии», ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина», Россия, Екатеринбург nemikhin@rambler.ru	Nemikhin, Yurii E. Senior lecturer Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, Russia, Ekaterinburg
Немков Дмитрий Александрович магистрант кафедры «Атомные станции и возобновляемые источники энергии», ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина», Россия, Екатеринбург xeqlol@gmail.com	Nemkov, Dmitrii A. Master student Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, Russia, Ekaterinburg
Никитин Александр Дмитриевич инженер-исследователь кафедры «Атомные станции и возобновляемые источники энергии», ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина», Россия, Екатеринбург studentshurik@gmail.com	Nikitin, Alexander D. Engineer Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, Russia, Ekaterinburg
Новиков Геннадий Абрамович д-р техн. наук, профессор, ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А. И. Бурназяна ФМБА России, Россия, Москва ganovikov41@mail.ru	Novikov, Gennadij A. Professor FGBU GNC FMBC A. I. Burnazjan, Russia, Moscow
Носов Даниил Антонович зав. лабораторией кафедры «Атомные станции и возобновляемые источники энергии», ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина», Россия, Екатеринбург dragzar@mail.ru	Nosov, Daniil A. Laboratory head Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, Russia, Ekaterinburg

Обухова Наталья Викторовна студент кафедры «Атомные станции и возобновляемые источники энергии», ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина», Россия, Екатеринбург enatikru@gmail.com	Obukhova, Natalia V. Student Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, Russia, Ekaterinburg
Ошканов Николай Николаевич д-р техн. наук, профессор кафедры «Атомные станции и возобновляемые источники энергии», ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина», Россия, Екатеринбург	Oshkanov, Nikolai N. Professor Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, Russia, Ekaterinburg
Павлюк Елена Юрьевна канд. техн. наук, доцент кафедры «Теплоэнергетика и теплотехника», ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина», Россия, Екатеринбург	Pavluk, Elena Y. Assistant professor Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, Russia, Ekaterinburg
Пахалуев Валерий Максимович д-р техн. наук, профессор кафедры «Атомные станции и возобновляемые источники энергии», ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина», Россия, Екатеринбург	Pakhaluev, Valeriy M. Professor Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, Russia, Ekaterinburg
Попов Александр Ильич канд. техн. наук, доцент-исследователь кафедры «Атомные станции и возобновляемые источники энергии», ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина», Россия, Екатеринбург sveropov@rambler.ru	Popov, Alexander I. Assistant professor Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, Russia, Ekaterinburg
Радченко Руслан Васильевич старший преподаватель кафедры «Атомные станции и возобновляемые источники энергии», ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина», Россия, Екатеринбург	Radchenko, Ruslan V. Senior lecturer Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, Russia, Ekaterinburg
Ральников Павел Андреевич магистрант кафедры «Тепловые электрические станции», ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина», Россия, Екатеринбург ral-pavel@mail.ru	Ralnikov, Pavel A. Master student Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, Russia, Ekaterinburg
Ремез Виктор Павлович д-р техн. наук, директор НПП «ЭКСОРБ», Россия, Екатеринбург sorb@bk.ru	Remez, Victor P. Director Scientific Production Enterprise EKSORB, Russia, Ekaterinburg
Ровнейко Андрей Васильевич начальник лаборатории качества, Филиал ОАО «Концерн Росэнергоатом» Белоярская атомная электростанция, Россия, Заречный ouc@belnpp.ru	Rovneyko, Andrey V. Laboratory head Rosenergoatom, Beloyarskaya NPP, Russia, Zarechny
Русских Иван Михайлович главный инженер, АО «Институт реакторных материалов», Россия, Заречный ivan_rusских1982@mail.ru	Rusских, Ivan M. Head Engineer JSC «Institute of Nuclear Materials», Russia, Zarechny

Рыжков Александр Филиппович д-р техн. наук, профессор кафедры «Тепловые электрические станции», ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина», Россия, Екатеринбург	Ryzhkov, Aleksandr Ph. Professor Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, Russia, Ekaterinburg
Седов Александр Сергеевич Магистрант, ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина», Россия, Екатеринбург swat1k@bk.ru	Sedov, Alexander S. Master student Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, Russia, Ekaterinburg
Селезнев Евгений Николаевич главный инженер исследовательской ядерной установки, АО «Институт реакторных материалов», Россия, Заречный evgenselez@mail.ru	Seleznev, Evgeniy N. Head Engineer JSC «Institute of Nuclear Materials», Russia, Zarechny
Семенов Николай Андреевич магистрант кафедры «Тепловые электрические станции» ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина», Россия, Екатеринбург nikolay940@mail.ru	Semenov, Nicolai A. Master student Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, Russia, Ekaterinburg
Сесекин Александр Николаевич д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры «Прикладная математика», ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина», Россия, Екатеринбург sesekin@list.ru	Sesekin, Aleksandr N. Professor Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, Russia, Ekaterinburg
Синяков Анатолий Алексеевич студент кафедры «Атомные станции и возобновляемые источники энергии», ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина», Россия, Екатеринбург vermin915kss@rambler.ru	Sinyakov, Anatoliy A. Student Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, Russia, Ekaterinburg
Смотрицкий Андрей Владимирович главный инженер, ООО «Биоэнергия», Россия, Екатеринбург info@wisesoil.org	Smotritskiy, Andrei V. Head Engineer, Bioenergy LLC, Russia, Ekaterinburg
Соколова Маргарита Сергеевна аспирант кафедры «Атомные станции и возобновляемые источники энергии», ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина», Россия, Екатеринбург margheritasokolova@gmail.com	Sokolova, Margarita S. Post-graduate student Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, Russia, Ekaterinburg
Та Ван Тхыонг студент кафедры «Атомные станции и возобновляемые источники энергии», ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина», Россия, Екатеринбург	Ta, Van Thyong Student Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, Russia, Ekaterinburg
Таширева Ирина Александровна студент кафедры «Атомные станции и возобновляемые источники энергии», ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина», Россия, Екатеринбург irinatashireva@yandex.ru	Tashireva, Irina A. Student Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, Russia, Ekaterinburg

Ташлыков Олег Леонидович канд. техн. наук, доцент кафедры «Атомные станции и возобновляемые источники энергии», ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина», Россия, Екатеринбург otashlykov@list.ru	Tashlykov, Oleg L. Assistant professor Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, Russia, Ekaterinburg
Терентьева Татьяна Вячеславовна магистрант кафедры «Атомные станции и возобновляемые источники энергии», ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина», Россия, Екатеринбург terenteva-tt@yandex.ru	Terenteva, Tatyana V. Master student Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, Russia, Ekaterinburg
Терпелец Михаил Александрович магистрант кафедры «Атомные станции и возобновляемые источники энергии», ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина», Россия, Екатеринбург mikhail.terpelets@gmail.com	Terpelets, Mikhail A. Master student Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, Russia, Ekaterinburg
Титов Геннадий Павлович канд. физ.-мат. наук, научный сотрудник кафедры «Атомные станции и возобновляемые источники энергии», ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина», Россия, Екатеринбург	Titov, Gennadij P. Scientist Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, Russia, Ekaterinburg
Тупоногов Владимир Геннадьевич д-р. техн. наук, профессор кафедры «Теплоэнергетика и теплотехника», ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина», Россия, Екатеринбург v.g.tuponogov@urfu.ru	Tuponogov, Vladimir G. Professor Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, Russia, Ekaterinburg
Тучков Андрей Михайлович канд. техн. наук, заместитель главного инженера, Филиал ОАО «Концерн Росэнергоатом» Белоярская атомная электростанция, Россия, Заречный tam@uraltc.ru	Tuchkov, Andrey M. Rosenergoatom, Beloyarskaya NPP, Russia, Zarechny
Тюльпа Валентина Владимировна канд. техн. наук, доцент кафедры «Теплоэнергетика и теплотехника», ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина», Россия, Екатеринбург tvalvl@list.ru	Tyulpa, Valentina V. Assistant professor Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, Russia, Ekaterinburg
Усова Мария Александровна студент кафедры «Атомные станции и возобновляемые источники энергии», ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина», Россия, Екатеринбург maryekb@ya.ru	Usova, Maria A. Student Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, Russia, Ekaterinburg
Филиппов Прокопий Сергеевич аспирант кафедры «Тепловые электрические станции», ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина», Россия, Екатеринбург fps_proxi@mail.ru	Filippov, Procopius S. Post-graduate student Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, Russia, Ekaterinburg

Фризен Василий Эдуардович д-р техн. наук, доцент кафедры «Электротехника и электротехнологические системы», ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина», Россия, Екатеринбург vfrizen@yandex.ru	Frizen, Vasily E. Assistant professor Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, Russia, Ekaterinburg
Ха Хюи Мань студент кафедры «Атомные станции и возобновляемые источники энергии», ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина», Россия, Екатеринбург	Ha, Huy Manh Student Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, Russia, Ekaterinburg
Хайретдинова Лиана Радисовна магистрант кафедры «Атомные станции и возобновляемые источники энергии», ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина», Россия, Екатеринбург liana_haredinova@mail.ru	Khairtadinova, Liana R. Master student Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, Russia, Ekaterinburg
Хасанов Руслан Рустамович магистрант кафедры «Тепловые электрические станции», ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина», Россия, Екатеринбург hasanovruslan@mail.ru	Khasanov, Ruslan R. Master student Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, Russia, Ekaterinburg
Химчак Денис Михайлович Зам. директора, Филиал ОАО «Концерн Росэнергоатом» Белоярская атомная электростанция, Россия, Заречный khimchak@belnpp.ru	Khimchak, Denis M. Deputy director Rosenergoatom, Beloyarskaya NPP, Russia, Zarechny
Хоссейн Исмаил аспирант кафедры «Атомные станции и возобновляемые источники энергии», ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина», Россия, Екатеринбург durekothau309@gmail.com	Hossain, Ismail Post-graduate student Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, Russia, Ekaterinburg
Худякова Галина Ивановна канд. техн. наук, кафедра «Тепловые электрические станции», ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина», Россия, Екатеринбург uge87@mail.ru	Khudyakova, Galina I. Assistant professor Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, Russia, Ekaterinburg
Циглевкина Ксения Николаевна студент кафедры «Атомные станции и возобновляемые источники энергии», ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина», Россия, Екатеринбург ks-maravilla@yandex.ru	Tsiglevkina, Ksenia N. Student Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, Russia, Ekaterinburg
Черных Денис Олегович студент кафедры «Атомные станции и возобновляемые источники энергии», ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина», Россия, Екатеринбург den93@e1.ru	Cherykh, Denis O. Student Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, Russia, Ekaterinburg

Чиканцев Григорий Евгеньевич студент кафедры «Атомные станции и возобновляемые источники энергии», ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина», Россия, Екатеринбург chikancev@bk.ru	Chikantsev, Grigoriy E. Student Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, Russia, Ekaterinburg
Шабурова Анастасия Анатольевна магистрант кафедры «Электротехника и электротехнологические системы», ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина», Россия, Екатеринбург 16shaburova@mail.ru	Shaburova, Anastasia A. Master student Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, Russia, Ekaterinburg
Шастин Арнольд Георгиевич канд. техн. наук, профессор кафедры «Атомные станции и возобновляемые источники энергии», ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина», Россия, Екатеринбург arnold-shastin@yandex.ru	Shastin, Arnold G. Professor Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, Russia, Ekaterinburg
Шеломенцев Иван Антонович аспирант кафедры «Атомные станции и возобновляемые источники энергии», ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина», Россия, Екатеринбург ia.shelomentsev@urfu.ru	Shelomentsev, Ivan A. Post-graduate student Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, Russia, Ekaterinburg
Шмакова Лидия Александровна студент кафедры «Тепловые электрические станции», ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина», Россия, Екатеринбург sh.l.a.1995@mail.ru	Shmakova, Lidiya A. Student Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, Russia, Ekaterinburg
Шульгина Екатерина Сергеевна студент кафедры «Атомные станции и возобновляемые источники энергии», ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина», Россия, Екатеринбург risusmaga@mail.ru	Shulgina, Ekaterina S. Student Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, Russia, Ekaterinburg
Шумков Дмитрий Евгеньевич студент кафедры «Атомные станции и возобновляемые источники энергии», ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина», Россия, Екатеринбург shumkov_dmitriy@mail.ru	Shumkov, Dmitry E. Student Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, Russia, Ekaterinburg
Шутов Андрей Дмитриевич магистрант кафедры «Атомные станции и возобновляемые источники энергии», ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина», Россия, Екатеринбург Andrew_Shutoff@mail.ru	Shutov, Andrei D. Master student Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, Russia, Ekaterinburg
Щеклеин Сергей Евгеньевич д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Атомные станции и возобновляемые источники энергии», ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина», Россия, Екатеринбург s.e.shcheklein@urfu.ru	Shcheklein, Sergey E. Professor Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, Russia, Ekaterinburg

Яковлев Илья Владимирович магистрант кафедры «Атомные станции и возобновляемые источники энергии», ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина», Россия, Екатеринбург ilyxayakovlev@gmail.com	Yakovlev, Ilya V. Master student Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, Russia, Ekaterinburg
---	---

